INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



LENTES GRAVITATORIAS

Septiembre 1988

450 PTAS.

INVESTIGACION Y
CIENCIA
Septiembre de 1988 Número 144

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Eduardo Battaner: *Lentes gravitatorias*; Ana García García: *Hormonas hematopoyéticas*; Montserrat Domingo: *El ciclo del supercontinente*; Luis Bou: *Aritmética y azar* y *Juegos de ordenador*; Amando García Rodríguez: *Condensadores*; Juan Luis Serra: *Cómo enfoca el ojo humano*; Jaime Alvar: *La comunidad del cañón del Chaco*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Libros:

Luis Alonso, María José Báguena y Pere Molera

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
7	F. Sancho, Hospital de Sant Pau, Barcelona
8	X. Estivill, R. Williamson y Maria Rieradevall
12	X. Estivill y R. Williamson
13	X. Estivill, R. Williamson y Maria Rieradevall
15	Jaqueline N. Hewitt
16-19	Joe Lertola
20	F. N. Owen y J. J. Puschell, cortesía del Observatorio Radioastronómico Nacional (*arriba y centro*); P. E. Greenfield, D. H. Roberts y B. F. Burke, cortesía del Observatorio Radioastronómico Nacional (*abajo*)
23	David W. Golde
24-27	Patricia J. Wynne
28	David W. Golde
29	Patricia J. Wynne
30	David W. Golde
32-34	Ian Worpole
37-42	George Retseck
45	James Kilkelly, cortesía de Paulson Casino Supplies of New Jersey, Inc.
46	Quesada/Burke, tomado de *Hilbert*, de Constance Reid, ©1970
47	©Arnold Newman
48	Bob Conrad
49	Murray Greenfield
50	Bob Conrad
53	Quesada/Burke
54-57	George V. Kelvin, Science Graphics
58	Robin Revell, Corning Glass Works
61	Patricia N. Farnsworth, Universidad de Medicina y Odontología de New Jersey en Newark
62	Carol Donner
63	Tomado de *Tissues and Organs: A Text-Atlas of Scanning Electron Microscopy*, de Richard G. Kessel y Randy H. Kardon, ©1979 W. H. Freeman and Company (*arriba*); Carol Donner (*abajo*)
64	Carol Donner
65	Jane F. Koretz
66	Patricia N. Farnsworth, Universidad de Medicina y Odontología de New Jersey en Newark
67	Jane F. Koretz
71	Paul Logsdon
72	Tom Prentiss
73	Laurie Burnham
74-75	Tom Prentiss
76-77	Laurie Burnham
78	Tom Prentiss
79	Paul Logsdon
82-85	Michael Goodman
87-90	Thomas C. Moore



LA PORTADA es una fotografía del nombre "Einstein", visto a través de una lente que curva la luz igual que lo haría una lente gravitatoria (véase "Lentes gravitatorias", por Edwin L. Turner, en este mismo número). Las medias lunas amarillas del centro corresponden a la inversión y a la imagen especular de las letras *S* y *T*. Las lentes gravitatorias aparecen cuando el campo gravitatorio de una galaxia curva la luz de un cuásar distante. Las imágenes distorsionadas aportan información sobre el espacio que separa ambos objetos. La lente de la imagen es cortesía de Edwin L. Turner.

Fotografía de portada de S. Varnedoe

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
REDACCIÓN Carlos Oppenheimer, Josep Maria Farré Josa
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
PROMOCIÓN EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica, S. A. Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona (ESPAÑA)

SCIENTIFIC AMERICAN

DIRECTOR EDITORIAL Jonathan Piel
REDACCIÓN Armand Schwab, Jr. (Subdirector), Timothy Appenzeller, Timothy M. Beardsley, John M. Benditt, Laurie Burnham, David L. Cooke, Jr., Ari W. Epstein, Gregory R. Greenwell, John Horgan, June Kinoshita, Ricki L. Rusting, Karen Wright
DIRECTOR ARTÍSTICO Samuel L. Howard
DIRECTOR DE PRODUCCIÓN Richard Sasso
PRESIDENTE HONORARIO Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	4950	9000
Extranjero	5500	10.000

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 450 pesetas
Extraordinario: 575 pesetas

- Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
- En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
- El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel.652 42 00

para los restantes países:

Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona
Teléfono 322 05 51

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Teléfonos 409 70 45 - 409 70 46

Cataluña:
Paulino Muñoz Victoria
Muntaner, 467-469, 3º 3ª 08021
Barcelona
Teléfono 211 92 45

OJD Difusión Publicidad

ISSN 0210-136X Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona

Fotocromos reproducidos por Reprostudy, S. A. Buenos Aires, 51 - 08902 Hospitalet (Barcelona)

Gráfica Elzeviriana, S. A. Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11 - 08013 Barcelona

Printed in Spain - Impreso en España

Hace…

José M.ª López Piñero

…cien años

José Madrid Moreno publicó, en los *Anales de la Sociedad Española de Historia Natural*, el trabajo titulado *Sobre las terminaciones nerviosas periféricas en la mucosa olfatoria de los peces*:

"Durante mi permanencia en Nápoles, en el laboratorio de Anatomía y Embriología Comparadas del profesor Sr. Trinchese, juntamente con la Estación Zoológica, cuyas facilidades me ofreció la generosa bondad de su director, Sr. Dohrn, he continuado estudiando la parte correspondiente a la mucosa olfatoria de los peces, y especialmente sobre las terminaciones nerviosas, pues ya en otra Memoria publicada recientemente traté sobre el significado morfológico de los botones olfatorios. Conociéndose ya hoy relaciones comparativas más o menos directas con este órgano, he aprovechado el material fresco, y que tan abundante se encuentra en aquel golfo, para hacer diferentes preparaciones en que se pudiese observar el camino y dirección de los nervios, así como sus terminaciones y la topografía general de la cápsula olfatoria.

"Separando la mucosa nasal, la he tratado con diferentes líquidos, que hoy se recomiendan por la técnica microscópica, usando de diferentes métodos, unos por vía de ensayo y otros como positivos en vista del resultado más o menos directo que obtenía. Las combinaciones con el cloruro de oro y el ácido ósmico son las que me han servido de base para ver con claridad las terminaciones nerviosas. Para los elementos epiteliales he usado el ácido acético a 1/100 durante pocos minutos, coloreando con carmín borácico, lavando en agua destilada, disociando con las agujas y montando en glicerina. Para el estudio de los nervios he usado varios métodos: lavar en agua destilada la mucosa, trasladarla a cloruro de oro a 1/100 durante pocos minutos, de 5 a 15, dejándola después 24 horas en ácido fórmico a 1/5 y conservando en glicerina; colocarla en alcohol de 30° durante una hora, trasladarla a ácido ósmico a 1/100 de 10 a 20 minutos, lavarla en agua destilada, colorearla por medio del picro-carmín y conservarla en glicerina. También obtuve buenos resultados con un líquido preparado por el Sr. Grieb, ayudante del profesor Trinchese, y cuya composición es: ácido acético a 5/100, gr. 100; ácido ósmico a 1/100, 50 gotas.

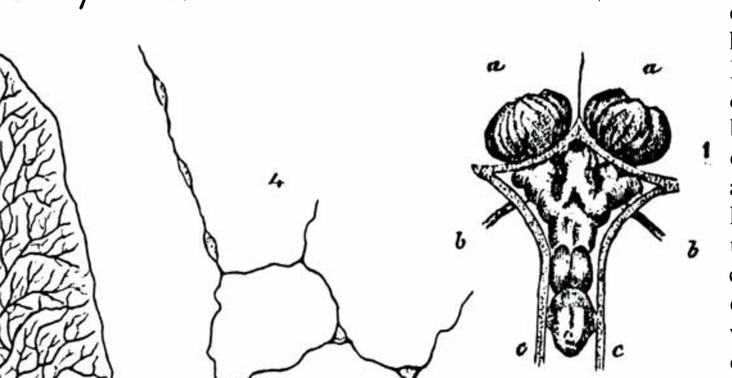
"Las especies examinadas y en estado adulto son:

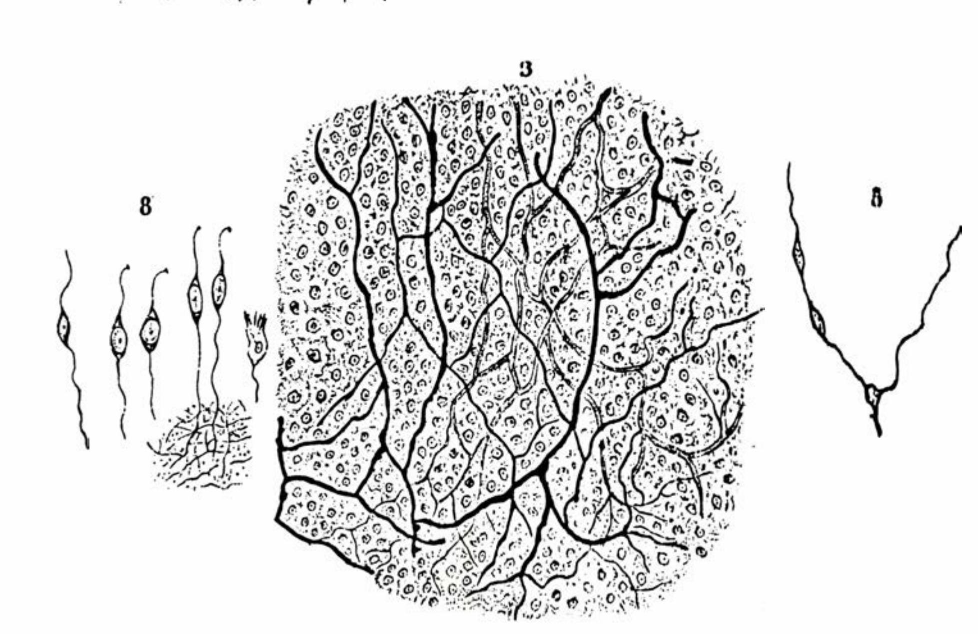
Scyllium canicula L.	*Pagellus mormyrus* Cuv.
— *catulus* M.H.	*Raja asterias* M.H.
Serranus cabrilla L.	*Scorpaena porcus* L.

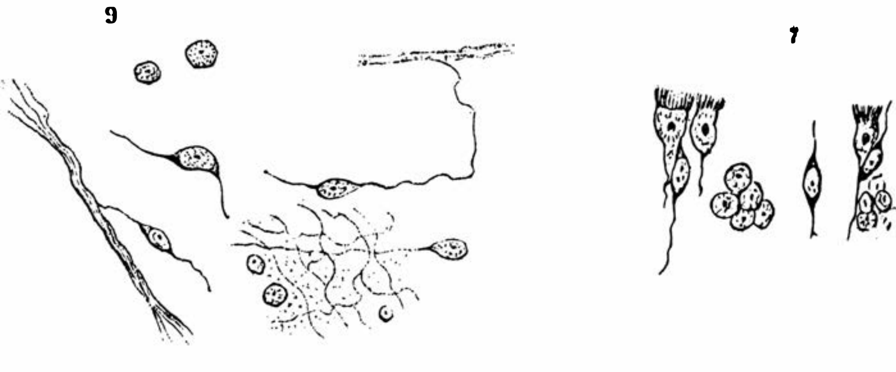
"Si separamos con cuidado la mucosa nasal de un pez, vemos que está adherida a las paredes de la cápsula huesosa o cartilaginosa, y más fuertemente todavía por la parte inferior con el nervio olfatorio, de corta extensión y unido a la masa cerebral. Una vez que este nervio llega a la mucosa olfatoria, comienza a dividirse en muchos ramos, que llamaríamos principales, y que es fácil observar con poco aumento, y, aun a simple vista, en aquellos ejemplares que ofrecen un tamaño relativamente grande, como el *Scyllium, Raja, Torpedo*, etc. Cada uno de estos ramos principales corresponde a los diferentes pliegues o estrías en que está dividida la mucosa. En aquellas especies cuya cápsula es redondeada por completo irradian, por decirlo así, del nervio olfatorio, situado en el centro y en la base, los ramos principales, distribuyéndose por los pliegues; pero en aquellos cuya cápsula es más o menos ovalada, el nervio principal, una vez que parte del cerebro, sigue la línea transversal situada en el fondo de la mucosa, y de donde se distribuyen a uno y otro lado los nervios de los pliegues, que vienen a ser perpendiculares a dicha línea. Como entran en la constitución de la mucosa vasos sanguíneos, linfáticos y tejido conjuntivo, es necesario emplear algún reactivo en que se pongan de relieve los nervios. El uso del cloruro de oro da buen resultado para este estudio; pero no conociéndose aún métodos satisfactorios que conduzcan a completo éxito, no en todos los casos se puede recomendar. Con las soluciones a 1 por 100 se obtiene buenas coloraciones. Así he podido observar las divisiones y bifurcaciones que van tomando las fibras, cada vez más finas, a medida que se van acercando al estrato epitelial que forma la mucosa y que reviste el interior de la cápsula. El color azulado intenso que toman las fibras nerviosas permite seguir el curso de su distribución. El nervio principal, así como las fibras, carecen de envoltura o *mielina*.

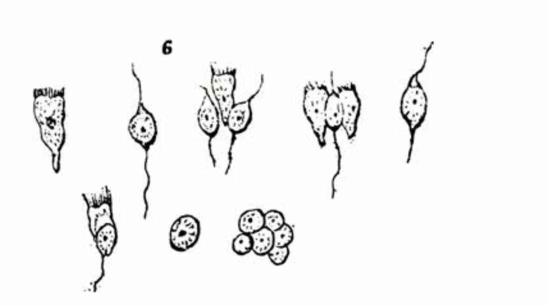
"Cada pliegue podemos considerarlo como una red nerviosa cuyos principales ramos corresponden a la parte que llamaríamos externa de la mucosa, es decir, a la unión de ésta con la cápsula o cavidad craneal. Las fibras que aquí nacen se dividen o subdividen, llegando a formar una espesa red, donde se distinguen finísimos hilos nerviosos que de trecho en trecho están interrumpidos por células sensitivas y de naturaleza nerviosa, pertenecientes a este sistema. Empleando fuertes aumentos es como se puede seguir con claridad el camino de estas finísimas fibras, que van a terminar en una *célula sensitiva*

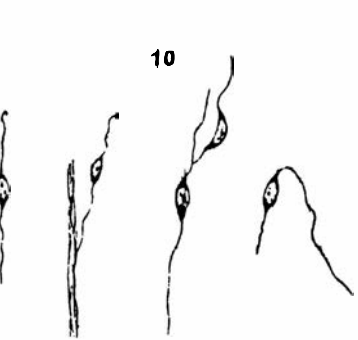
Anales de la Soc. española de Hist. nat. — *Tomo XVII. Lám. I.*













F. Kraus, lit.

con una prolongación nerviosa. Pero como esto sucede ya dentro del epitelio, indicaremos la constitución de éste. Las primeras células que lo forman son *células epiteliales* provistas de cirros vibrátiles, cuyo movimiento en un trozo de membrana, separada en vivo del animal, es fácil distinguir. De forma cilíndrica, tienen por la parte inferior una larga prolongación que podemos considerar como medio para la nutrición de la célula, supuesto que éstas sirven como de glándulas unicelulares secretoras de una especie de mucosidad, de la que en su interior está bañada la mucosa. Entre cada dos células epiteliales de cirros vibrátiles, y por su extremo inferior, hay una célula redondeada con dos prolongaciones correspondientes a sus dos polos opuestos. Una de estas prolongaciones es un hilo nervioso que se dirige al centro a unirse con las fibrillas, y que se puede considerar como hilo transmisor de las sensaciones. La otra prolongación libre pasa por entre dos paredes de las células epiteliales y termina en un pequeñísimo ensanchamiento, quedando al nivel de los cirros vibrátiles. Que esta prolongación libre sea de naturaleza nerviosa, lo prueba su estructura lisa; pues si tuviese pequeñas granulaciones, sería una continuación del protoplasma celular. Esta clase de células *nervioso-*

1. Cerebro de Scyllium canicula.*— a) cápsulas olfatorias; b) nervios ópticos; c) tejido cartilaginoso. 2. Un pliegue de la mucosa de* Serranus cabrilla.*— Parte externa y unida a la cápsula huesosa. En el interior está situado el epitelio y las terminaciones. 3. Un trozo de mucosa de* Scorpaena corpus, *tratada con el cloruro de oro, donde se deja ver una red nerviosa superior y otras enlazadas inferiormente. 4. Red de nervios, con células pertenecientes al sistema nervioso antes de llegar a ser terminales.* Scyllium catulus. *5. Idem id., pero ofreciendo más finura. 6. Células disociadas de una* Raja asterias, *epiteliales, sensitivas y basales, tal como se presentaban en la preparación. 7. Las mismas, donde se ve una célula terminal entre dos epiteliales. 8. Células nervioso-periféricas separadas, con hilos nerviosos, y en su extremo libre un pequeño botón o ensanchamiento. 9. Células nervioso-periféricas, con su hilo nervioso, y unido éste a otros nervios más gruesos.* Pagellus mormyrus. *10. Células nervioso-periféricas con su hilo nervioso separadas del restante epitelio por disociación. En la parte superior y libre se nota el pequeño botón o ensanchamiento.* Serranus cabrilla.

periféricas son las más importantes en el epitelio, supuesto que tienen la función de recoger y transmitir las sensaciones a los lóbulos cerebrales. Disociando con las agujas un trozo de mucosa sumamente transparente, y poniéndola en el microscopio, se deja ver con claridad uno de estos hilos nerviosos, con su célula periférica y su extremo libre. En todas aquellas preparaciones que he tenido ocasión de observar, la prolongación libre siempre termina en un pequeñísimo botón o ensanchamiento, a diferencia de otras terminaciones en la mucosa nasal de algunos mamíferos, en que, siendo aquél más abultado, deja ver una estructura más complicada. Estando la terminación nerviosa en contacto con los cirros vibrátiles de las células de revestimiento, probablemente el movimiento de éstas debe ejercer alguna función sobre las prolongaciones libres de la célula nerviosa periférica, cual es la de poner en continuo movimiento las pequeñas partículas olorosas, y que éstas impresionen el pequeño botón o ensanchamiento para que se transmita a la *célula periférica*, y de ésta a las fibrillas nerviosas, recorriendo todo el camino que siguen los nervios, hasta llegar a los núcleos redondeados del lóbulo central del cerebro, considerados por algunos autores como verdaderos cuerpos olfatorios en sentido fisiológico. El último estrato de células está constituido por las *basales* o de *sostén*, colocadas precisamente debajo de las *nervioso-periféricas*. La forma redondeada es constante, y sólo por efectos mecánicos de unión puede modificarse aquélla. También se observan, entre éstas, otras más pequeñas e iguales en estructura, que son células jóvenes en vías de formación."

José Madrid Moreno era un "doctor en ciencias naturales" especializado en "micrografía" que ingresó en la Sociedad Española de Historia Natural en 1887. Este mismo año publicó en los *Anales* de la asociación otro trabajo en la misma línea del que acabamos de citar, bajo el título de *Investigaciones experimentales sobre la significación morfológica de las papilas o botones terminales de la mucosa olfatoria en ciertos peces óseos*. Como hemos visto, trabajó en el Laboratorio de Anatomía y Embriología Comparadas y en la Estación Zoológica, de Nápoles, centro de primera importancia en la investigación biológica de la época. A ello se reduce toda la información de que dispongo acerca de esta figura. Sin duda, alguno de los lectores podrá sacarme de mi ignorancia.

Genética molecular de la fibrosis quística

La genética ha permitido aislar la región cromosómica donde se encuentra el gen mutado en la fibrosis quística, posibilitando el diagnóstico prenatal y la detección de los portadores

Xavier Estivill y Robert Williamson

La biología molecular constituye una herramienta poderosa para analizar enfermedades hereditarias cuyo desencadenante bioquímico se desconoce. Este es el caso de la fibrosis quística (FQ), o mucoviscidosis. En los últimos dos años, las investigaciones desarrolladas han promovido importantes avances en el desciframiento de los mecanismos genéticos y moleculares de esta enfermedad.

De las enfermedades autosómicas recesivas graves, la FQ es la más frecuente en la población de raza blanca, con una incidencia aproximada de 1 por cada 1600 recién nacidos y una frecuencia de portadores de 1 por cada 20. En una pareja que tiene un hijo con la enfermedad, el gen mutado (portador de la fibrosis quística) está presente en ambos padres; significa ello que se corre el riesgo de que uno de cada cuatro de sus hijos sufra la enfermedad, en tanto que la mitad de la descendencia será portadora del gen mutado, pudiendo pasarlo, a su vez, a las generaciones siguientes.

XAVIER ESTIVILL y ROBERT WILLIAMSON pertenecen al grupo de investigación de la genética de la fibrosis quística de la Universidad de Londres. Estivill es investigador de la Fundació Sant Pau de Barcelona, en cuya universidad se doctoró en medicina, especializándose en hematología. Desde 1985 trabaja en el departamento de bioquímica y genética molecular de Bob Williamson en Londres, donde dirige varios proyectos de investigación para el análisis genético de la fibrosis quística. Williamson es profesor de bioquímica en el St Mary's Hospital de la Universidad de Londres. Ha trabajado en estudios genéticos de hemoglobinopatías, distrofia muscular de Duchenne y otras enfermedades hereditarias. Ha desarrollado nuevas técnicas para el análisis genético y diagnóstico prenatal.

La FQ es una enfermedad de las células epiteliales exocrinas, que presentan alteradas la secreción y la absorción. Los pacientes producen un moco espeso y viscoso que obstruye los conductos del órgano donde se localiza. Aunque la enfermedad afecta a la mayoría de los órganos, el páncreas y los pulmones son los más dañados; hasta el punto de que la insuficiencia pancreática y la enfermedad pulmonar determinan la severidad del proceso, así como el pronóstico y la mortalidad. Los pulmones de los pacientes con fibrosis quística, aunque estructuralmente normales, se hallan expuestos a una hipersecreción de moco e infecciones recurrentes, con el consiguiente desarrollo de procesos bronquiales crónicos.

Fue el análisis *postmortem* del páncreas lleno de quistes y fibrótico el que dio nombre a la enfermedad. La insuficiencia pancreática se acompaña de malabsorción intestinal desde el nacimiento. Algunos niños presentan manifestaciones graves en la primera semana de vida, especialmente porque nacen con meconio compactado que da lugar a un cuadro de íleo meconial que se ha de corregir por vía quirúrgica. A pesar de ello, en el casi el 15 por ciento de los niños se detecta la enfermedad cuando se presenta un fallo en el crecimiento, entre los seis meses y los cinco años de edad.

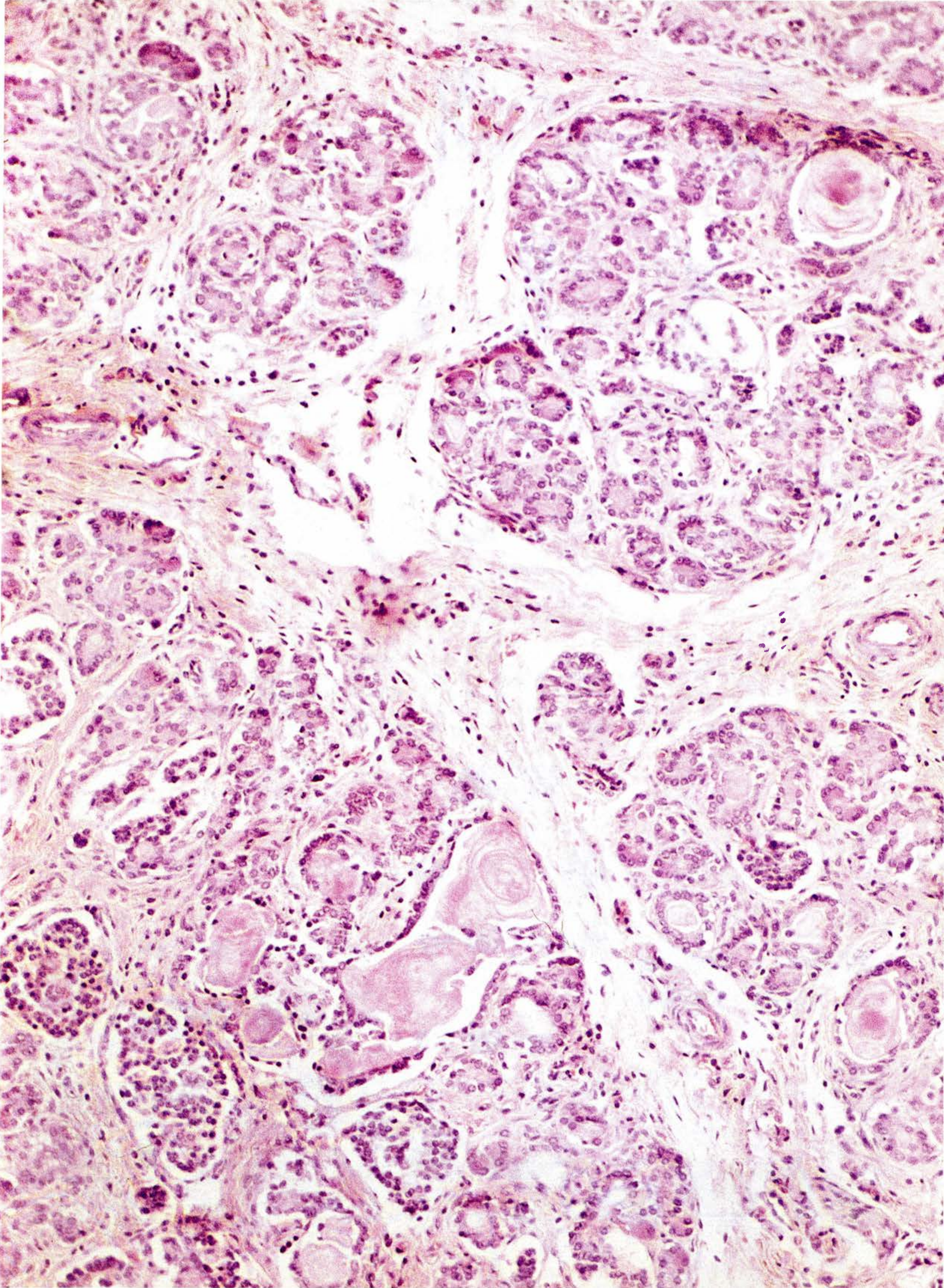
Cuando se descubrió la fibrosis quística, el pronóstico se limitaba a unos meses o pocos años. Hoy, la mayoría de los pacientes sobreviven la infancia con una esperanza de vida media, en centros especializados, de 20 a 25 años. Las razones principales de tan importante mejoría obedecen a un diagnóstico precoz, la antibioticoterapia y la medicina preventiva.

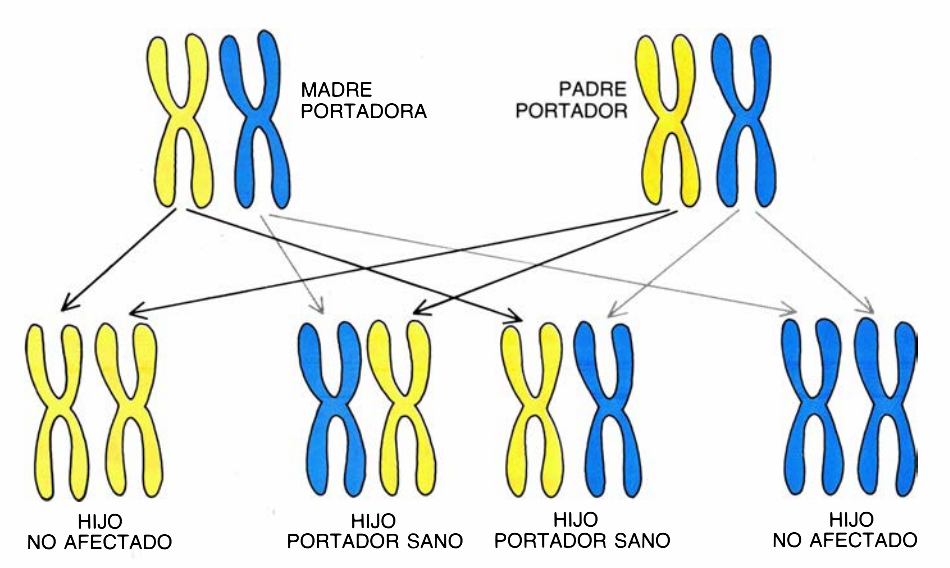
Los estudios fisiopatológicos han demostrado que el defecto de la FQ se sitúa en la regulación del transporte iónico de las células epiteliales exocrinas. La concentración de electrolitos en el sudor de los pacientes de FQ resulta altísima; el contenido en sales de los enfermos superan, en tres o cinco veces, el correspondiente a los individuos normales. A pesar de los esfuerzos y los avances registrados en el estudio de la fisiopatología de la FQ, el defecto fundamental de la enfermedad continúa siendo un enigma.

La tecnología del ADN recombinante ofrece un método totalmente distinto para abordar la investigación de las enfermedades cuyo defecto bioquímico se desconoce. La nueva genética utiliza los fragmentos de restricción de longitud polimórfica (FRLP), obtenidos al digerir el ADN con enzimas de restricción, y recurre al análisis de ligamiento genético para localizar el gen responsable de la enfermedad en un cromosoma concreto y en una región determinada del mismo.

Un segundo paso implica el aislamiento de fragmentos de ADN de esa región cromosómica, cada vez más cercanos al gen mutado (portador del mal), y el estudio paralelo de posibles genes candidatos, fisiológicamente relacionados con la enfermedad. El estadio final estriba en la identificación

1. CAMBIOS ANATOMICOS en el páncreas de un paciente afecto de fibrosis quística, que es, entre las enfermedades autosómicas recesivas graves, la más frecuente en la población blanca. En la ilustración se observa la dilatación de los conductos pancreáticos y la oclusión de los mismos por material mucoso. Las glándulas parenquimatosas presentan atrofia y se han substituido por tejido fibroso. (Fotografía cedida por cortesía del doctor F. Sancho, del Servicio de Anatomía Patológica del Hospital de Sant Pau, Barcelona.)



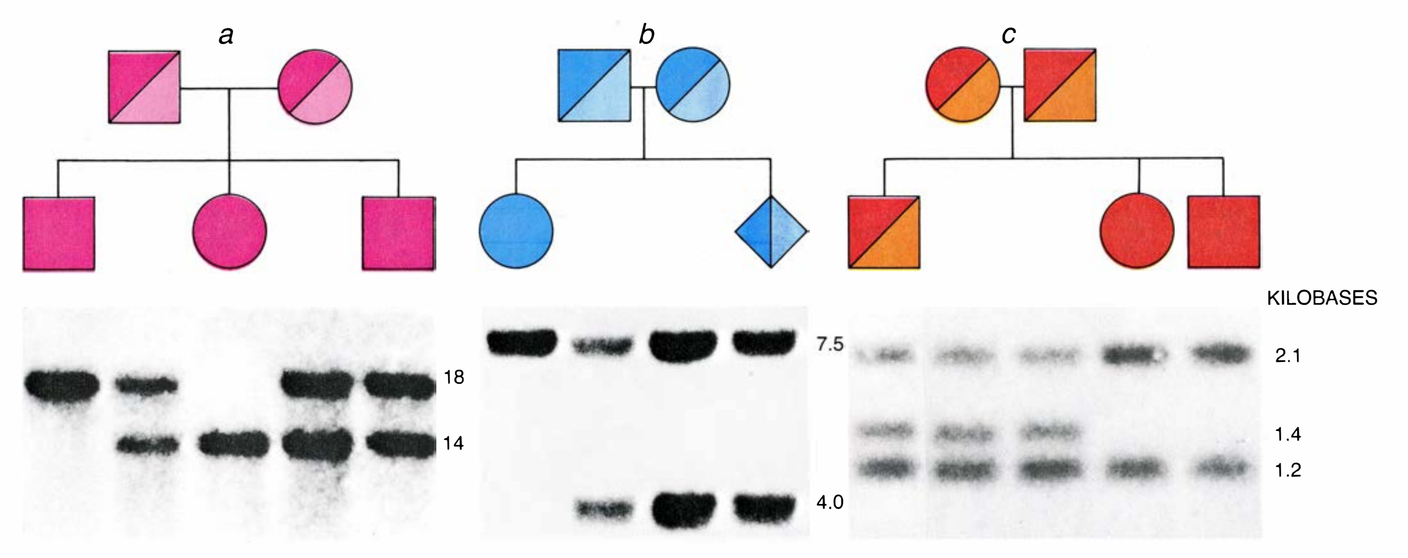


2. HERENCIA DE LA FIBROSIS QUISTICA. La fibrosis quística se hereda de forma autosómica recesiva. Los padres son portadores del gen mutado, pero no manifiestan la enfermedad en su fenotipo. De acuerdo con la leyes de Mendel, una cuarta parte de sus hijos padecerán la enfermedad, otra cuarta parte no quedarán afectados por la misma y la mitad restante será portadora del gen mutado y podrá transmitirlo.

del gen en cuestión y de la mutación o mutaciones responsables de la enfermedad. Esta nueva forma de análisis, que se conoce como genética "reversa", posibilita el estudio de una enfermedad de la que se desconoce el producto bioquímico, como es el caso de la FQ.

En nuestras investigaciones para identificar el defecto básico responsable de la fibrosis quística, comenzamos por estudiar los "genes candidatos". En una enfermedad hereditaria, llámase gen candidato aquel cuya secuencia de ADN se presume que ha sufrido alguna mutación, que puede causar o, en el caso de una enfermedad multifactorial o poligénica, contribuir al componente genético del fenotipo clínico anómalo. Durante años abundaron las sugerencias sobre posibles genes mutados, responsables de la FQ. Recordaremos, a modo de ejemplo, el gen que determina la superóxido desmutasa, el que codifica la calmodulina, el de la albúmina, el del factor 3 del complemento, así como reguladores de proteínquinasas dependientes del adenosín monofosfato cíclico (AMPc). Si disponemos de una sonda, esto es, de un fragmento de ADN recombinante, para someter a comprobación la acción de cada uno de los distintos genes aducidos, resolveremos qué gen está relacionado con la enfermedad contando con dos condiciones: que la sonda muestre un polimorfismo del ADN (FRLP) y trabajemos con familias con varios hijos afectados.

Sea el caso de la albúmina. El gen que la codifica se ha clonado ya, y se han identificado distintos polimorfismos en la secuencia del ADN. Durante la meiosis, es sabido, se produce un intercambio material genético entre cromosomas homólogos; ahora bien, esa recombinación es altamente improbable en el seno de un gen codificante: se cifra en torno al 0,001 por ciento en cada meiosis. Por consiguiente, si el gen mutado en la FQ fuese la albúmina, para una familia determinada con varios niños enfermos, cada hijo debe heredar los mismos alelos (distintas posibilidades de un *locus* determinado) de cada progenitor. Sin embargo, en el caso de la albúmina que nos ocupa, encontramos una familia con tres niños afectados, cada uno de los cuales había heredado un genotipo distinto. Si se parte de la hipótesis según la cual la FQ es una enfermedad que depende de un *locus* único, este sencillo experimento permite descartar a la albúmina de entre los genes candidatos. Aunque esta estrategia no tiene significación estadística, reviste gran valor porque no admite objeción.



3. ESTUDIOS FAMILIARES CON MARCADORES DEL ADN. El esquema de la izquierda (*a*) ilustra la exclusión del gen de la albúmina como presunto lugar donde residiera la mutación responsable de la fibrosis quística. En una familia sometida a estudio, con tres hijos que sufrían fibrosis quística, se observó que el patrón de herencia para un polimorfismo asociado al gen de la albúmina descartaba a dicho gen como responsable de la enfermedad. En el centro (*b*) se esquematiza el diagnóstico prenatal de fibrosis quística. Esta familia ejemplifica nítidamente la acción del marcador *met H*, pues ambos padres son heterocigotos y el hijo afectado es homocigoto para el marcador. Se obtuvo material fetal mediante biopsia de vellosidades coriónicas en la octava semana de embarazo; se preparó ADN, que fue digerido con la enzima de restricción TaqI, fraccionado en un gel de agarosa junto con las demás muestras, transferido a una membrana de nylon e hibridado con la sonda *met H*. La autorradiografía obtenida mostró que el feto (señalado aquí con un rombo sombreado sólo en la mitad) ha heredado un alelo ligado a la fibrosis quística y otro ligado a un cromosoma sano, por lo que será portador de la enfermedad. El tamaño de los fragmentos se establece en kilobases. El equema de la derecha (*c*) nos muestra el análisis de segregación del marcador XV-2c en una familia con dos niños que padecen fibrosis quística. En estudios realizados en más de 500 familias europeas y norteamericanas, se ha podido observar que el alelo de 2.1 kilobases se encuentra asociado a la enfermedad en el 90 por ciento de los cromosomas de fibrosis quística, mientras que en cromosomas normales ese alelo tiene una frecuencia de sólo el 35 %.

Existe la posibilidad de considerar las regiones cromosómicas de forma similar a los genes candidatos para enfermedades hereditarias. Para el caso de la fibrosis quística se ha sugerido el cromosoma 4 y el extremo del brazo largo del cromosoma 13. Los datos relacionados con el cromosoma 4 procedían de la observación de la expresión de un factor de dicinesia en un medio en el cual crecían células que portaban cromosomas humanos. Un análisis detallado de ligamiento con varias sondas demostró que el gen de la FQ no se alojaba en el cromosoma 4. Se sugirió la posible relación del cromosoma 13 con la FQ tras observar que, en una familia con FQ, la madre presentaba una translocación entre el extremo del brazo largo del cromosoma 13 y el cromosoma 6. Pero en nuestro laboratorio demostramos la inexistencia de ligamiento genético entre sondas situadas en esa región y la FQ; quedaba así excluida esa zona como el *locus* de la enfermedad.

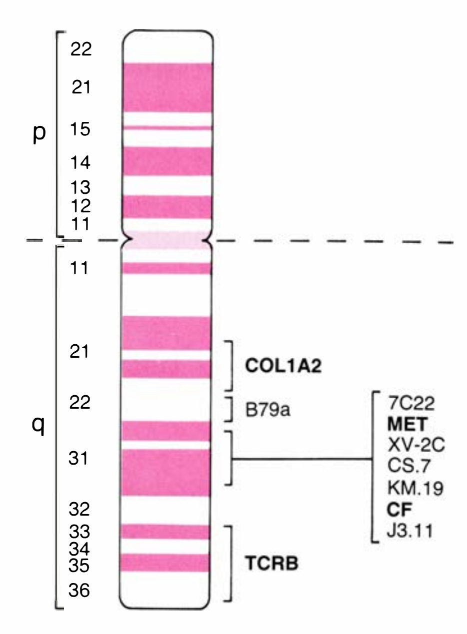
El método que condujo a la identificación de la región cromosómica mutada en la FQ se basa en la saturación del genoma humano con marcadores polimórficos y el estudio de ligamiento en familias con varios hijos afectados. Saturar el genoma con marcadores polimórficos significa utilizar marcadores situados en regiones cromosómicas determinadas, de forma que el total de estos marcadores cubra el genoma entero en los estudios de ligamiento genético. El uso de marcadores ligados se conoce desde los estudios clásicos de Alfred Henry Sturtevant sobre la genética de *Drosophila melanogaster*, en 1913. El primer ligamiento humano demostrado entre un fenotipo y un marcador de ADN correspondió a las hemoglobinopatías en la región de los genes de las globinas beta, y fue encontrado por Kan y Dozy en 1978. Diez años más tarde, contamos ya con más de 2000 marcadores clonados, la mayoría de los cuales pertenecen a sondas anónimas, localizada cada una en su lugar del cromosoma.

En agosto de 1985 se celebró en Helsinki la octava conferencia sobre cartografía genética humana. Varios de los grupos asistentes (en particular, el de Copenhague, el de Berkeley-Stanford, el de Boston, el de Londres o nuestro, el de Salt Lake City y el de Toronto) nos estábamos esforzando por aislar el gen mutado de la FQ y elaboramos un mapa de exclusión para la enfermedad. De los resultados, se comprobaba la existencia de un modesto ligamiento con la enzima hepática paraxonasa (PON). Cuando se estudió la actividad de este marcador proteico en las familias portadoras de fibrosis quística con varios niños afectados, se observó un ligamiento de unas 15 unidades de mapa (unos 15 centimorgan), lo que suponía una frecuencia de recombinación del 15 por ciento. Aunque el ligamiento de PON revestía especial interés, tenía una valor restringido, pues la proteína no estaba bien caracterizada y se desconocía su localización cromosómica.

Con estos datos en la mano, los distintos grupos mencionados nos pusimos a estudiar las regiones cromosómicas que no habían quedado excluidas. Casi simultáneamente, tres grupos (Toronto, Salt Lake y St Mary) obtuvimos ligamientos con sondas situadas en el cromosoma 7. De estos marcadores, dos, a saber, J3.11 (St Mary) y *met* (Salt Lake) se hallan lo bastante cerca del *locus* FQ como para poder utilizarlos en el diagnóstico. Nuestro grupo describió además ligamiento para la FQ con las sondas anónimas 7C22 (que dista de FQ un par de centimorgans) y B79a, el gen pro-alfa-2(I) colágeno (COL1A2) y el gen de la cadena beta del receptor de células T (TCRB).

Utilizando los marcadores que se encuentran más cerca de FQ podemos realizar estudios familiares y determinar si los hijos que no se hallan afectados son portadores o son homozigotos normales. Así, pues, por primera vez se ha podido discriminar entre niños portadores del gen FQ y niños sanos, en el seno de familias con un niño enfermo de ese mal. La proporción de portadores a homocigotos normales viene a ser de 2 a 1, según era de esperar al tratarse de una enfermedad recesiva. El diagnóstico prenatal de FQ durante el primer trimestre de embarazo es también posible utilizando sondas de ADN y análisis de tejido fetal. Durante el último año se han realizado más de 100 diagnósticos prenatales de FQ en Europa (unos 50 en Estados Unidos), en los que se ha utilizado ADN fetal preparado a partir de vellosidades coriónicas, y los marcadores J3.11 y *met*.

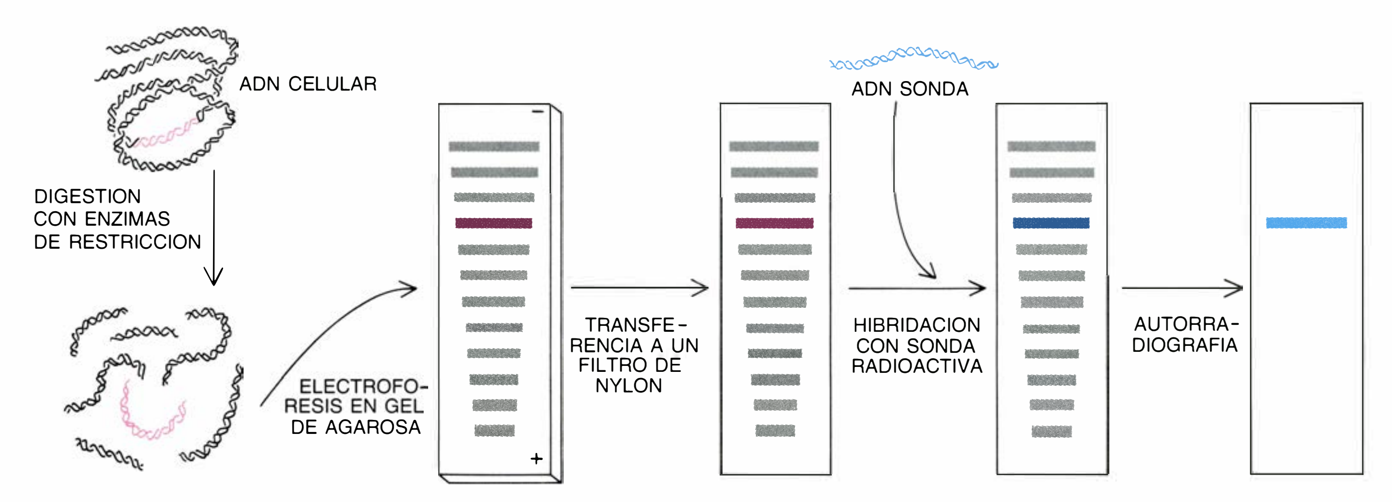
No obstante, el valor de esos avances era limitado. En primer lugar, un 15 por ciento de las familias no se beneficiaban del diagnóstico prenatal al no ser informativas para los marcadores; esto es, los marcadores de ADN no eran útiles en estas familias. Por otro lado ese ligamiento para la FQ no suponía una ventaja para los propios enfermos de FQ. Por último, la reducción del número de casos de FQ gracias al diagnóstico prenatal y la detección de portadores se halla restringida a las familias que tienen ya un hijo enfermo. Así, pues, es necesario aislar el gen que se encuentra mutado en la fibrosis quística para poder detectar los portadores del mismo en la población general y poder hallar nuevas formas terapéuticas más racionales. Durante los dos últimos años hemos venido desarrollando distintas estrategias ordenadas a ese fin.



4. MARCADORES o sondas que presentan ligamiento con la fibrosis quística. De los marcadores recogidos, los denominados XV-2c, CS.7 y KM.19 son los más cercanos a la fibrosis quística, y se hallan estrechamente ligados a la enfermedad. Unicamente se ofrecen los marcadores del brazo largo del cromosoma 7, cercanos al *locus* de la fibrosis quística.

Una vez localizado, en el cromosoma, el gen de una enfermedad mediante análisis de ligamiento, existen varias posibilidades para acercarnos a dicho gen. Posibilidades que dependen, en algunos casos, de claves citogenéticas que sugieren anomalías cromosómicas que ayuden a aislar el gen defectuoso. Tal ha ocurrido para enfermedades como la distrofia muscular de Duchenne y el retinoblastoma. Ahora bien, en la fibrosis quística no existen deleciones macroscópicas, ni otros marcadores citogenéticos que faciliten la tarea de la localización fina del gen.

Cabe entonces la posibilidad, entre otras, de saturar una región cromosómica con varios marcadores. Estos pueden aislarse a partir de genotecas de cromosomas específicos, separados mediante fluorometría. Y cabe una posibilidad alternativa: diseccionar cromosomas bajo contraste de fases y microclonar la región de interés. Iniciamos esos proyectos, pero es bastante difícil identificar, por contraste de fases, el cromosoma 7, y la utilización de



5. CARTOGRAFIA GENETICA mediante el método de transferencia Southern ("Southern blotting"). El ADN preparado a partir del tejido a estudiar se digiere con enzimas de restricción, se fracciona luego en un gel de agarosa y se transfiere a una membrana de nylon. El ADN que servirá de sonda se marca radiactivamente y se hibrida después con el ADN fijado en la membrana. La exposición del filtro a una película radiográfica produce una señal identificable.

genotecas específicas de todo el cromosoma 7 difícilmente hubiese proporcionado sondas que estuviesen más cerca del lugar donde se encuentra el gen, que las que ya disponíamos.

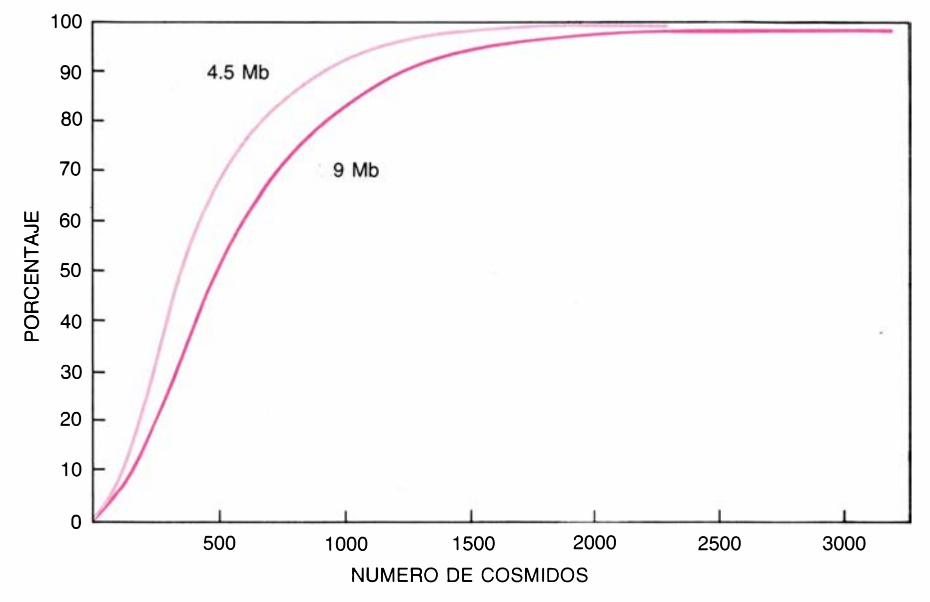
Las sondas informativas estrechamente ligadas a la FQ son difíciles de ordenar en distancias "pequeñas", del orden de varios millones de pares de bases. Obedece ello a que hay pocas familias con recombinación; por ello, los grupos que trabajamos en fibrosis quística hemos colaborado en el estudio de familias que presentaban fenómenos de recombinación con FQ y los marcadores J3.11 o *met*. Estos estudios demostraron que el *locus* de la FQ se encuentra entre los marcadores *met* y J3.11. Sin embargo, resultaba improbable un progreso rápido en el análisis del gen de la FQ contando de manera exclusiva con esta estrategia: el poder analítico de esa técnica había dado de sí todo lo que podía en el caso de la FQ.

Se trataba, pues, de aislar la secuencia de ADN que se encuentra entre ambos marcadores (J3.11 y *met*) y estudiar esa región utilizando técnicas físicas más que genéticas.

Teníamos ante nosotros distintas técnicas moleculares de cartografía física: análisis de ADN de alto peso molecular por electroforesis en geles mediante campos de pulsación (PFGE, abreviación de "pulsed-field gel electrophoresis"), sobreposición de cósmidos (vectores que permiten clonar fragmentos de ADN de hasta 45 kilobases), genotecas saltadoras y ligadoras (conocidas también por sus calificativos ingleses de "jumping" y "linking", respectivamente: saltan y ligan saltos en el genoma) y, por último, paseo cromosómico (o "chromosome walking", que supone enlazar distintos fragmentos cromosómicos clonados en bacteriófagos o cósmidos.) Para que no fracase esa batería de posibilidades técnicas, es necesario conocer el orden de los marcadores (incluido el gen de la FQ) y asegurar así que cualquier "paso" o "salto" tenga un principio, un orden y un final. Los cósmidos que contengan los marcadores *met* y J3.11 son, obviamente, puntos de iniciación, sobre todo si se utilizan vectores que permitan pasos direccionales. Resulta bastante sencillo saturar una región del genoma con cósmidos, que pueden analizarse mediante sobreposición (al estudiar qué fragmentos comparten los distintos clones). Una región como la que nos ocupa, de unos 2 centimorgan de longitud genética, corresponde, en extensión física, a unas 2000 kilobases, aunque no es lo mismo longitud genética que longitud física.

Conseguimos aislar líneas celulares de ratón que contenían como único componente humano la región del cromosoma 7, donde se halla el gen de la fibrosis quística. La selección del fragmento del cromosoma humano se realizó gracias a que uno de los marcadores más próximos al gen de la FQ es un oncogén (*met*), y éste, cuando se halla activado, es capaz de transformar células de ratón 3T3. Se establecieron varias líneas celulares híbridas, que contenían fragmentos del cromosoma 7 de entre un millón a varios millones de bases (megabases); tales líneas celulares se obtuvieron a partir de una línea celular tumoral. Este es el tamaño de genoma que puede analizarse con relativa sencillez mediante la técnica de PFGE.

Con el propósito de examinar con detalle esas líneas celulares y la región del cromosoma 7 que contiene el gen de la FQ, hemos construido y analizado



6. ESTIMACION DEL NUMERO DE COSMIDOS necesarios para analizar, por superposición de fragmentos, transgenomas humanos de 4,5 y 9 megabases, partiendo de un tamaño de inserción medio de 35 kilobases de ADN. Esos transgenomas constituyen el componente humano de las líneas celulares construidas.

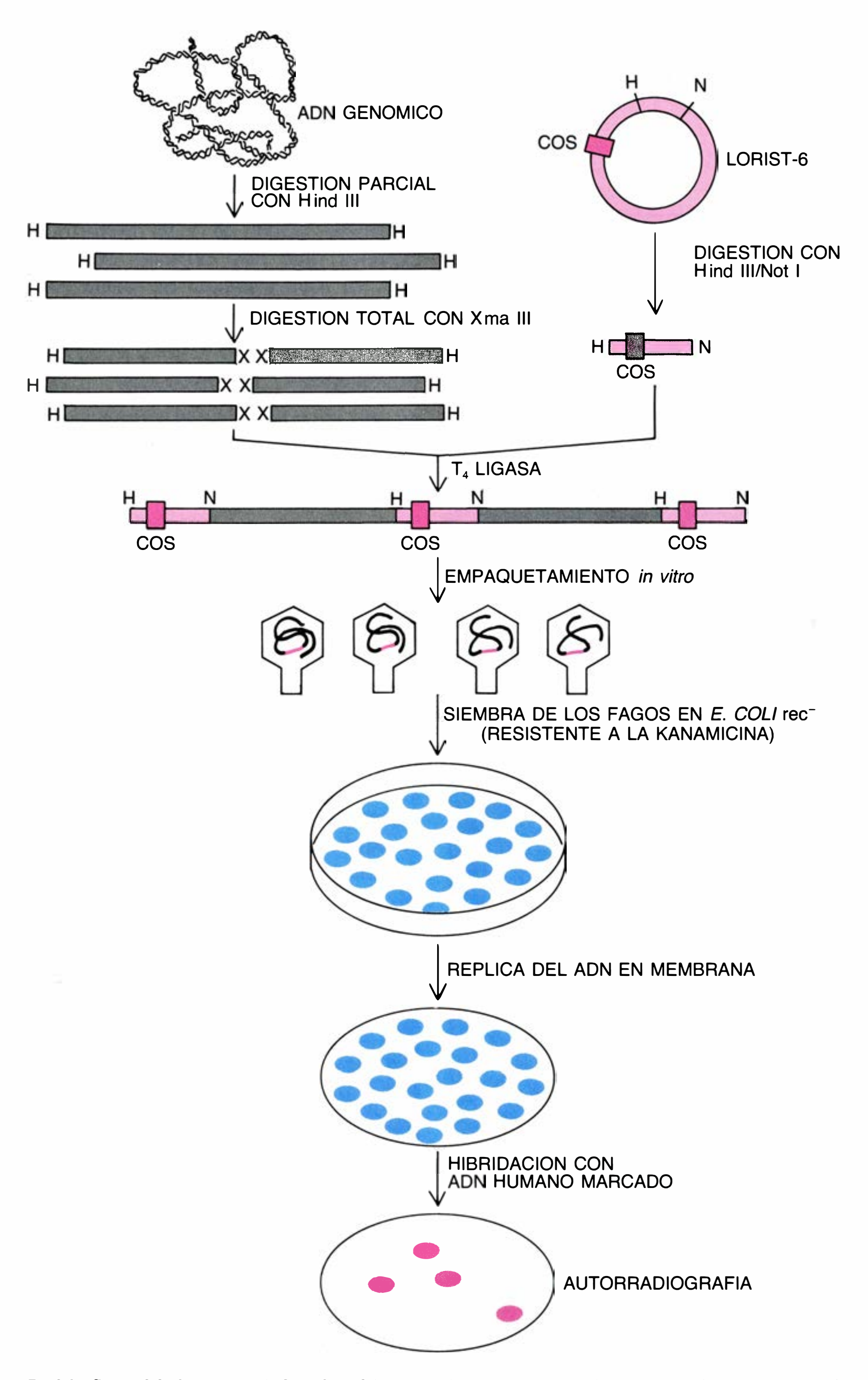
varias genotecas de cósmidos. Hemos preparado así un banco de clones de más de 550 cósmidos humanos, situados en esta región del cromosoma 7; gracias al cual, se puede construir un mapa físico de dicha región donde se ubiquen los distintos cósmidos. Y así fue como aislamos cósmidos que cubrían unas 160 kilobases de la región del oncogén *met*. Pero no se trata de un método fácil. Aunque bastarían 300 cósmidos para cubrir 10 megabases de ADN, se necesitan muchos más para elaborar un mapa de sobreposición. Por otro lado, se desconoce el alcance de las reordenaciones o mutaciones puntuales que podrían haberse dado en la construcción de estas líneas celulares. Fue, pues, necesario elaborar estrategias de análisis que permitiesen obtener nuevos marcadores, estratégicamente espaciados, e identificar secuencias codificantes.

El genoma de los mamíferos se encuentra metilado en su mayor parte, existiendo un 1 por ciento del ADN libre de metilación. La metilación del ADN se limita casi exclusivamente al dinucleótido CpG. Hay enzimas de restricción que reconocen secuencias ricas en ese dinucleótido si no se hallan metiladas. Tales enzimas (*Not*I, *BssH*II, *Sac*II, *Nar*I, *Nae*I y *Xma*III) generan fragmentos de elevado peso molecular.

La identificación de cósmidos que contienen dichos lugares de restricción es de utilidad para poder elaborar mapas de regiones determinadas de un cromosoma; en la construcción de estos mapas resulta decisiva la técnica de PFGE. Ocurre que estos lugares de restricción se agrupan en zonas del genoma sin metilar y ricas en el dinucleótido CpG, zonas o secuencias que han recibido distintas denominaciones: islas HTF (del inglés "*Hpa* II tiny fragments"), islas CpG o islas libres de metilación. Las islas HTF se hallan asociadas a genes, y se han descrito en situación 5' de la mayoría de éstos, incluidos los primeros exones de los mismos. La identificación de islas HTF como marcadores nos permite aislar genes candidatos.

Para aislar clones portadores de islas HTF recurrimos a dos estrategias distintas. Consistía la primera en utilizar oligonucleótidos de siete u ocho pares de bases que presentaran la secuencia reconocida por las enzimas de restricción *Not*I, *Xma*III, *Bssh*II y *Sac*II como sondas para identificar cósmidos que ofrecieran lugares de restricción para esas enzimas. De acuerdo con la segunda estrategia, construimos genotecas especiales para clonar de manera selectiva dichas zonas del genoma humano. Con ese propósito nos servimos de un vector especial, que posee, entre sus lugares de clonaje, la secuencia para la enzima *Not*I. Este vector, denominado Lorist-6, resultó de especial utilidad para clonar zonas sin metilar del transgenoma humano de una de estas líneas celulares; esto es, del componente humano de estas células híbridas de ratón/hombre. Identificamos así varios clones humanos; de entre ellos, dos cósmidos que se hallan unidos por una secuencia *Not*I común, que forma parte de una isla HTF situada entre los marcadores más cercanos a la fibrosis quística (*met* y J3.11).

La isla HTF detectada posee 12 lu-



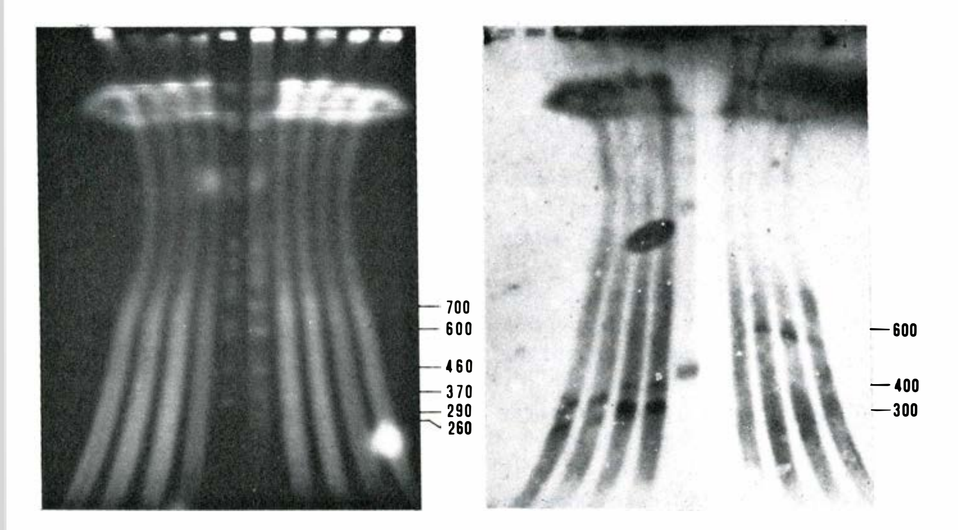
7. CONSTRUCCION DE UNA GENOTECA en cósmidos para detectar islas HTF en ADN de células híbridas de hombre y ratón. El ADN genómico se digiere parcialmente con HindIII y, de forma completa, con XmaIII. Tras fraccionar el ADN en gradientes de sal, se inserta éste en el ADN del cósmido, previamente digerido con las enzimas NotI e HindIII. Las moléculas recombinantes se introducen en las cápsides de bacteriófago mediante empaquetamiento *in vitro*. Posteriormente, cada cósmido infectará una bacteria y le conferirá resistencia contra la kanamicina; ello permite seleccionar los clones recombinantes. Utilizando ADN humano como sonda para hibridar el ADN de la genoteca, se detectan los clones humanos positivos.

gares de restricción para seis de estas enzimas, y se encuentra sin metilar en todos los tejidos estudiados. Los ensayos mediante PFGE nos permitieron situar físicamente esa isla entre los marcadores *met* y J3.11, equidistante de ambos: es decir, en el lugar donde presumiblemente se encuentra el gen de la fibrosis quística según lo indicado por estudios genéticos anteriores. Habíamos saltado, pues, desde estos marcadores hacia el gen de la FQ sin perder demasiado tiempo en exhaustivos análisis de "paseo cromosómico".

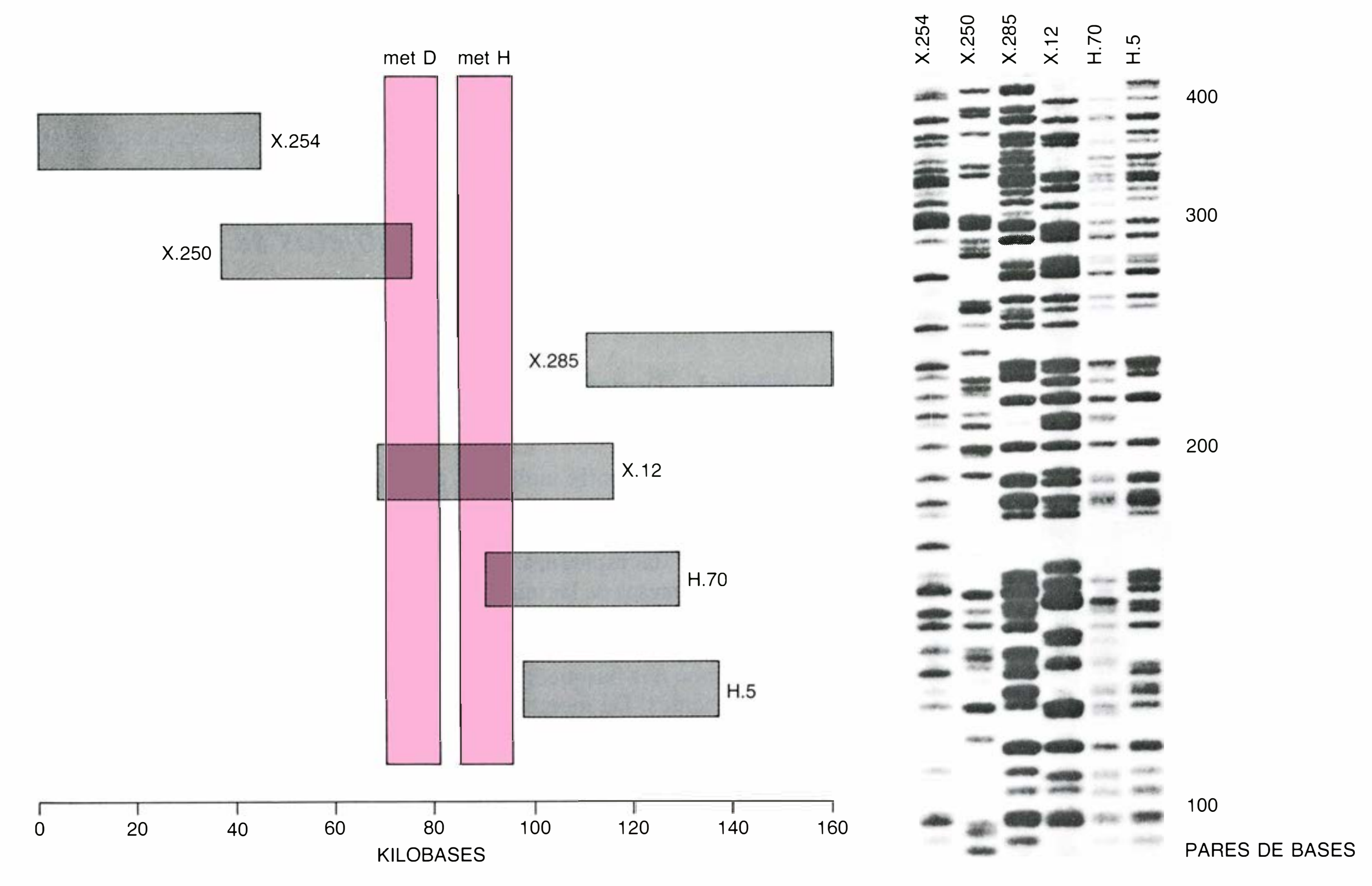
El paso siguiente consistió en descubrir si había un gen asociado a esa isla. Recurrimos a análisis de hibridación cruzada de ADN de distintas especies, que nos permitió observar que esa zona (llamada de forma provisional *locus* XV) se mantenía de una manera constante a lo largo de la evolución de las especies. La hibridación con ARN de tejidos diferentes confirmó que se trataba de una secuencia que lograba expresarse o traducirse. El posterior análisis de genotecas de ADN complementario (ADNc) de pulmón fetal y placenta nos permitió aislar dos clones, que luego serían secuenciados.

Este ADNc (lo hemos llamado *irp*) consta de 2318 pares de bases. La secuencia proteica que expresa o determina contiene 360 aminoácidos y presenta rasgos de proteína excretora. Dicha proteína muestra una estrecha semejanza, en su secuencia aminoacídica, con el proto-oncogén del ratón *int*-1 y con el homólogo de la mosca del vinagre *D-int*. El proto-oncogén *int*-1 se expresa en tejido cerebral fetal y en médula espinal de embriones de ratón. El mutante "wingless" (sin alas) de *Drosophila melanogaster* pertenece a una clase de genes de la polaridad segmental. La estrecha homología entre esas tres proteínas induce a pensar que constituyen una nueva familia de genes de los que determinan los factores del crecimiento. *Irp* está expresado en un espectro de tejidos humanos adultos que no se superpone con el patrón de expresión de *int*-1; de momento, los estudios realizados no han revelado ninguna clave sobre la función normal de esa proteína. Los estudios de comparación entre los análisis de sencuencias de ADNc perteneciente a clones de tejidos de FQ y de secuencias de ADNc perteneciente a tejidos normales no han mostrado ninguna diferencia en el patrón de expresión proteínica. Existen, sin embargo, otros clones HTF que hemos seleccionado y se están ahora analizando mediante PFGE para conocer su posición en el mapa de esta región del cromosoma 7.

Una vez clonada esta región cromosómica, el paso siguiente es obtener marcadores que muestren polimorfismo y que sean útiles en los estudios familiares. La fortuna nos acompañó y encontramos tres nuevos marcadores procedentes de esa región, que ponen de manifiesto una asociación alélica o desequilibrio de ligamiento; esto es, un alelo determinado se segrega con la enfermedad, en la mayoría de casos, para cada uno de esos tres marcadores. Los nuevos marcadores son pXV-2c, pCS.7 y pKM.19. Las posibles combinaciones de las asociaciones alélicas se denominan haplotipos. La FQ se encuentra asociada con un haplotipo determinado en más del 85 por ciento de los casos, mientras que el mismo haplotipo está presente en sólo el 17 por ciento de los



8. ANALISIS DE ADN utilizando la técnica de electroforesis en geles mediante campos de pulsación (PFGE). Medio millón de linfocitos de cada individuo (conservados en bloques de agarosa de baja temperatura de gelación) se digirieron con las enzimas de restricción BsshII o SfiI y se analizaron mediante PFGE. La membrana se hibridó luego con el marcador o sonda, *met D*. El tamaño de los fragmentos se da en kilobases.



9. RECORRIDO CROMOSOMICO alrededor de la región del oncogén *met*. Se identificaron seis cósmidos mediante análisis de "walking" cromosómico (anglicismo común aquí) que cubrían una extensión de 160 kilobases (*arriba*). Se procedió luego al análisis mediante el método de "impresión de huellas digitales" de seis cósmidos de la región *met*. La enzima de restricción HinfI se encargó de digerir el ADN de los cósmidos; los fragmentos resultantes se marcaron radiactivamente y se introdujeron luego en un gel de poliacrilamida. La autorradiografía (*derecha*) muestra que los clones comparten varios fragmentos.

cromosomas normales. El desequilibrio encontrado con esos marcadores para la fibrosis quística es excepcional entre las enfermedades hereditarias y reviste una enorme importancia: nos habla, en primer lugar, de la homogeneidad de la enfermedad, de forma que una sola mutación es responsable, por lo menos, del 85 por ciento de los casos de fibrosis quística; en segundo lugar, nos informa de que la mutación sucedió después de la separación de razas, hace sólo algunos miles de años; por último, este desequilibrio implica que nos hallamos, físicamente, muy cerca del gen de la enfermedad, quizás a menos de 50 kilobases, lo que vendría a equivaler a un cósmido en un experimento sencillo de paseo cromosómico.

El análisis de otros clones HTF procedentes de la misma genoteca y situados en la vecindad del gen *irp* terminará por dilucidar finalmente cuál es el gen mutado en la fibrosis quística.

El intenso desequilibrio de ligamiento obtenido con los nuevos marcadores admite aplicaciones inmediatas en el diagnóstico prenatal de la fibrosis quística. En más del 97 por ciento de las familias puede recabarse ya información en el diagnóstico prenatal con una fiabilidad superior al 99 por ciento, fiabilidad que a menudo no puede ofrecerse para la hemofilia o la talasemia (por citar dos enfermedades cuyo gen mutado se ha clonado y analizado ya). Con independencia de estas ventajas para el diagnóstico prenatal, el desequilibrio puede utilizarse para detectar los portadores entre familias de las que no existe material genético de un paciente con fibrosis quística. Por otra parte, en determinadas poblaciones, como en la danesa, en la que el desequilibrio es muy intenso, se pueden realizar ya pruebas de exclusión de portadores entre la población general utilizando estos marcadores.

Los progresos en el conocimiento de los aspectos genéticos de la fibrosis quística han sido notables en los últimos años. Los nuevos marcadores ensayados, muy próximos al gen mutado en la FQ, permiten ya un diagnóstico prenatal más seguro y posibilitan la detección de portadores. La identificación de la mutación o mutaciones responsables de la enfermedad constituye el próximo reto a superar. Con ello se abrirán enormes posibilidades para la terapéutica y la prevención. El conocimiento de la proteína implicada en el fenotipo FQ, a su vez, nos permitirá avanzar en el desciframiento de la fisiopatología de la misma y plantear un tratamiento más acertado a los pacientes. Una vez conocida la mutación se pueden poner en marcha planes de detección de los portadores con fines preventivos. Tal es el poder de la nueva genética cuando se aplica a la patología molecular.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A CANDIDATE FOR THE CYSTIC FIBROSIS LOCUS ISOLATED BY SELECTION FOR METHYLATION-FREE ISLANDS. X. Estivill, M. Farrall, P. J. Scambler, G. M. Bell, K. M. Hawley. N. J. Lench, G. P. Bates, H. C. Kruyer, P. A. Frederick, P. Stanier, E. K. Watson, R. Williamson y B. J. Wainwright en *Nature*, vol. 326, nº 6116, págs. 840-845; 30 de abril de 1987.

INDIRECT CYSTIC FIBROSIS CARRIER DETECTION. M. Farrall, X. Estivill y R. Williamson en *Lancet*, vol. 2, págs. 156-157; 18 de julio de 1987.

A RAPID METHOD TO IDENTIFY COSMIDS CONTAINING RARE RESTRICTION SITES. X. Estivill y R. Williamson en *Nucleic Acids Research*, vol. 15, págs. 1415-1425; 1987.

PATTERNS OF POLYMORPHISM AND LINKAGE DISEQUILIBRIUM FOR CYSTIC FIBROSIS. X. Estivill, P. J. Scambler, B. J. Wainwright, K. Hawley, P. Frederick, M. Schwartz, M. Baiget, J. Kere, R. Williamson y M. Farrall en *Genomics* (en prensa).

Lentes gravitatorias

Estas casualidades cósmicas abren una ventana excepcional a los secretos del universo. La utilidad científica de estos objetos se pondrá de manifiesto tras la búsqueda sistemática actualmente en curso

Edwin L. Turner

Las casualidades estadísticas, la ocurrencia ocasional de procesos improbables, constituyen, por lo común, una fuente enojosa de confusión y error en la ciencia. Sin embargo, durante varios años, los astrónomos han puesto especial empeño en el descubrimiento e investigación de ciertos fenómenos celestes cuya existencia real depende de accidentes cósmicos insólitos. Me refiero a las lentes gravitatorias. Estas se producen cuando dos o más objetos, de distinta lejanía de la Tierra, yacen a lo largo de la misma dirección de observación y coinciden, pues, en el firmamento. La radiación del objeto más alejado –habitualmente un cuásar– se curva en el campo gravitatorio del objeto más próximo. La deflexión crea un espejismo cósmico: imágenes distorsionadas o múltiples del objeto más distante.

Las imágenes de las lentes gravitatorias ofrecen un amplio muestrario de distorsiones: corridas, aumentadas, contraídas, giradas, invertidas, multiplicadas, deformadas o aberrantes desde el punto de vista espectral. Estos efectos dependen de la geometría del alineamiento, los rasgos espaciales de la fuente lejana y la intensidad y forma del campo gravitatorio del objeto próximo. Por tanto, el fenómeno puede revelar muchos rasgos de la fuente imagen, que resultarían indetectables sin ese medio, así como del objeto próximo y del espacio que hay entre ambos. Tales observaciones podrían ayudar a resolver varias cuestiones cosmológicas fundamentales. Con la esperanza de que algún día las promesas de las lentes gravitatorias se conviertan en realidad, algunos grupos, incluido el del autor, están llevando a cabo una búsqueda sistemática de tales lentes. De momento, sin embargo, el mero descubrimiento de una lente constituye ya un progreso significativo.

EDWIN L. TURNER es profesor de astrofísica de la Universidad de Princeton. Estudió la carrera de físicas en el Instituto de Tecnología de Massachusetts; se recibió de doctor en el de California en 1975. Pasó algunas temporadas con becas de formación de posgraduados en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton. Tras cumplir un contrato docente con Harvard se trasladó a la Universidad de Princeton en 1978. Se ha especializado en astronomía extragaláctica y cosmología y no le es ajeno el dominio de las técnicas estadísticas avanzadas.

La historia del estudio de las lentes gravitatorias empezó nada menos que con el artículo fundamental de Einstein sobre la teoría general de la relatividad, en 1915. Proponía allí tres pruebas empíricas de la nueva teoría, siendo la más famosa la relativa a la deflexión de la luz de las estrellas que pasa rozando el borde del Sol. La teoría clásica de Newton predice que la luz caerá en una cierta proporción en el campo gravitatorio; la relatividad general asegura que la deflexión será precisamente el doble. Sir Arthur Eddington confirmó la predicción de Einstein durante el eclipse de 1919; la relatividad general ganó, a raíz de ello, una amplia aceptación.

Fuera de ese ejemplo, las lentes gravitatorias recibieron escasa atención hasta 1936, cuando Einstein publicó un cálculo breve donde mostraba que, si dos estrellas situadas a diferentes distancias coincidían exactamente en el cielo, la imagen de la más distante formaría un anillo. Pero menospreció este alineamiento por ser demasiado improbable como para tener un interés práctico. Al año siguiente, Fritz Zwicky, del Instituto de Tecnología de California, y Henry Norris Russel, de la Universidad de Princeton, sugirieron otras situaciones más probables. En particular Zwicky, con su intuición habitual, señaló que los procesos de lente entre objetos extragalácticos, tales como galaxias o cúmulos de galaxias, no sólo podían observarse, sino encerrar también un auténtico interés científico.

La historia moderna del estudio de las lentes gravitatorias empezó al comienzo del decenio de los sesenta, con el trabajo teórico, entre otros, de Sjur Refsdal, hoy en la Universidad de Hamburgo, quien reflexionó sobre el posible análisis de la imagen de una lente gravitatoria, en la hipótesis de encontrar alguna. Abundó también en la idea de que las lentes gravitatorias podrían ofrecer información cosmológica de notable importancia, en particular sobre la velocidad de expansión del universo y la densidad de materia oscura. Pero esas sugerencias quedaron relegadas al olvido, como fruto de la imaginación de los investigadores teóricos. Nadie había observado nunca un sistema real de lentes gravitatorias.

El interés por el tema se reavivó en 1979, a raíz del descubrimiento de un sistema de lente (0957 + 561) en la constelación de la Osa Mayor [véase "Descubrimiento de una lente gravitatoria" por Frederic H. Chaffe Jr., INVESTIGACIÓN Y CIENCIA; enero de 1981]. De acuerdo con la predicción de Zwicky, este sistema lenticular y otros hallados subsecuentemente han supuesto la alineación de dos o más objetos extragalácticos. En la mayoría de los casos, la fuente es un cuásar extremadamente lejano y el objeto lenticular más próximo es una galaxia o un cúmulo de galaxias sitos a una distancia moderada.

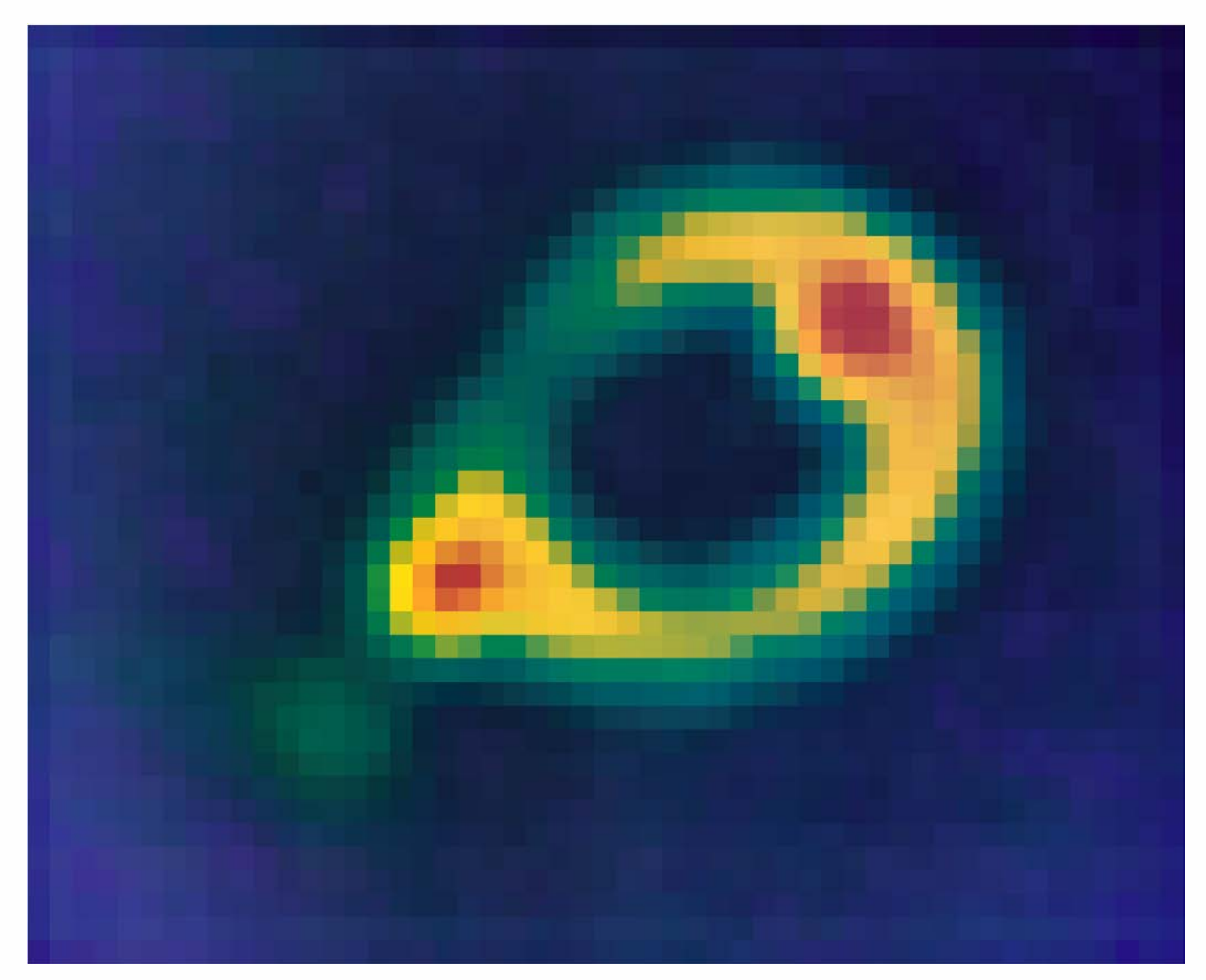
A lo largo de los últimos diez años, la investigación teórica y observacional sobre lentes gravitatorias ha crecido sin pausa y con rapidez. Hasta el momento de redactar este artículo, los astrofísicos han debatido ya sobre 17 candidatos, por lo menos, incluidos unos arcos luminosos gigantes descubiertos recientemente y lo que parece un "anillo de Einstein" casi perfecto. Los telescopios y radiotelescopios más potentes del

mundo dedican buena parte de su tiempo a la búsqueda e investigación de tales objetos.

A primera vista, las lentes gravitatorias podrían suponerse meras curiosidades divertidas. Aportan poca información experimental sobre la relatividad general y la gravitación que no pueda obtenerse más fácil y eficazmente mediante estudios que se limiten a nuestro sistema solar. ¿Por qué están, pues, los astrónomos tan interesados en estas carambolas cósmicas? Para responder a esta cuestión, es preciso conocer con cierto detalle la naturaleza de una lente gravitatoria.

La radiación emitida por un cuásar en los albores de la historia del universo viaja hacia nuestra galaxia. A medida que transcurre el tiempo, la expansión del universo alarga la longitud de onda de la radiación —el conocido fenómeno del corrimiento hacia el rojo—. La expansión obliga también al rayo luminoso a dispersarse mientras se propaga por el espacio. En su trayectoria, la radiación pasa junto a una galaxia y se desvía en el seno de su campo gravitatorio. La cuantía de esta desviación depende de la región del campo que se atraviese; igual que el ángulo de deflexión de la luz que atraviesa una lente óptica depende de la zona donde la luz incida exactamente en la lente. En consecuencia, el rayo puede emerger por varios caminos y dar lugar a imágenes múltiples, normalmente tres o cinco (la imagen original más otras imágenes adicionales que, según sostiene la teoría, siempre se producen a pares). Cada imagen aparece en una porción ligeramente diferente del cielo y puede estar aumentada o distorsionada en proporción variable. Alguna de las imágenes puede ser la simetría especular, o hallarse invertida.

Una imagen de lente gravitatoria surge de una compleja configuración de trayectorias luminosas en el seno del campo gravitatorio de la galaxia, la cual depende, a su vez, de la distribución espacial del material gravitante. De acuerdo con la relatividad general, este material incluye todas las formas de materia y energía. Por tanto, el objeto que crea la lente puede ser luminoso u oscuro, constituido por materia ordinaria o exótica, e incluso por materia desconocida, por materia condensada en estrellas o esparcida en forma de gas de partículas elementales. Más aún, todas las irregularidades de la distribución de materia que yacen en la trayectoria de la radiación contribuyen con nuevas deflexiones, pequeñas, y

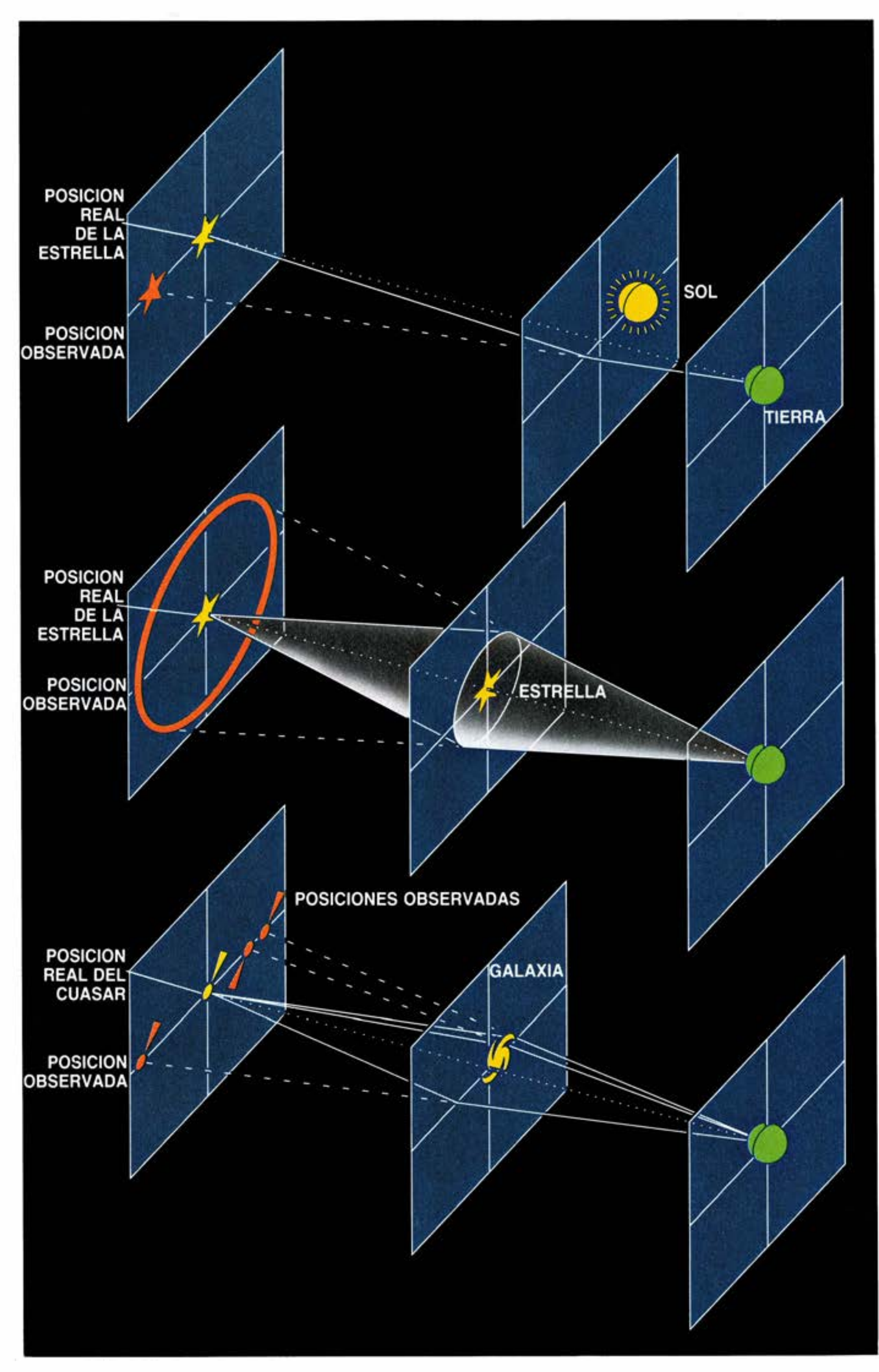


1. MISTERIOSO BUCLE COSMICO (MG 1131 + 0456), encontrado por Jacqueline N. Hewitt y sus colaboradores (entre ellos al autor); podría tratarse de la primera observación de un anillo de Einstein, es decir, de la imagen producida por una lente gravitatoria cuando los objetos mantienen una perfecta alineación [*véase la figura 2*). El objeto pudiera ser un chorro nuclear, una radiofuente típica cuya imagen es distorsionada al pasar por una galaxia elíptica. En esta radioimagen en falso color, los dos puntos anaranjados corresponden, presumiblemente, a una imagen doble del núcleo intenso de la fuente. La forma circular amarilla sería entonces una imagen anular del chorro, que se extiende directamente detrás del centro de la galaxia. La radiofuente, en la constelación de Leo, se había catalogado en 1950, pero su forma anular insólita se descubrió el año pasado con el radiotelescopio interferométrico de gran despliegue (VLA).

perturban, por tanto, las imágenes observadas.

Las imágenes de las lentes gravitatorias constituyen, pues, unos objetos astronómicos muy singulares. No sólo llevan impresas las propiedades de la fuente original, sino que poseen además información sobre la geometría a gran escala y la evolución del espaciotiempo, así como sobre la heterogeneidad del universo. La esperanza de descifrar algo de esta información es lo que incita al astrónomo al estudio de las mismas.

Hay tres categorías generales de información que los astrónomos esperan adquirir. En primer lugar, según propuso originalmente Zwicky, una lente gravitatoria puede constituir un telescopio natural de dimensiones cósmicas: la lente aumentaría la imagen fuente y obtendría información estructural que, sin ella, resultaría demasiado pequeña para su resolución. En segundo lugar, la imagen resultante proporcionaría información sobre las propiedades medias a gran escala del universo, incluido el valor de la constante cosmológica. En tercer lugar, la imagen permitiría la detección de heterogeneidades en el universo, en particular las referentes a la llamada masa oculta o materia oscura, que, según se cree, es responsable de la mayor parte de la densidad total del universo. Las dos últimas aplicaciones encierran la promesa de un aprovechamiento de las lentes gravitatorias para abordar problemas clásicos con nuevas herramientas.



2. EL EFECTO DE LENTE GRAVITATORIA ocurre cuando el campo gravitatorio de un objeto desvía la trayectoria de los fotones emitidos por una fuente más distante. La deflexión distorsiona la posición aparente de la fuente, así como su tamaño y forma. Einstein propuso la deflexión de la luz estelar por el Sol (*arriba*) y el anillo que aparecería si las estrellas estuvieran perfectamente alineadas (*centro*). Los sistemas lenticulares encontrados débense a la alineación de cuásares y galaxias (*abajo*). Nótese la imagen invertida.

Como ejemplo de la segunda categoría, las observaciones de lentes gravitatorias facilitarían la determinación directa del tamaño y edad del universo. Esta aplicación procede de la cosmología de la gran explosión ("big bang"); se funda ésta en la observación de que, a grandes escalas de distancia, los objetos se alejan unos de otros con velocidades proporcionales a la separación mutua. Para explicar este hecho empírico se parte de la hipótesis de la expansión uniforme. En un universo en expansión, la velocidad de los objetos que se alejan es directamente proporcional a su distancia.

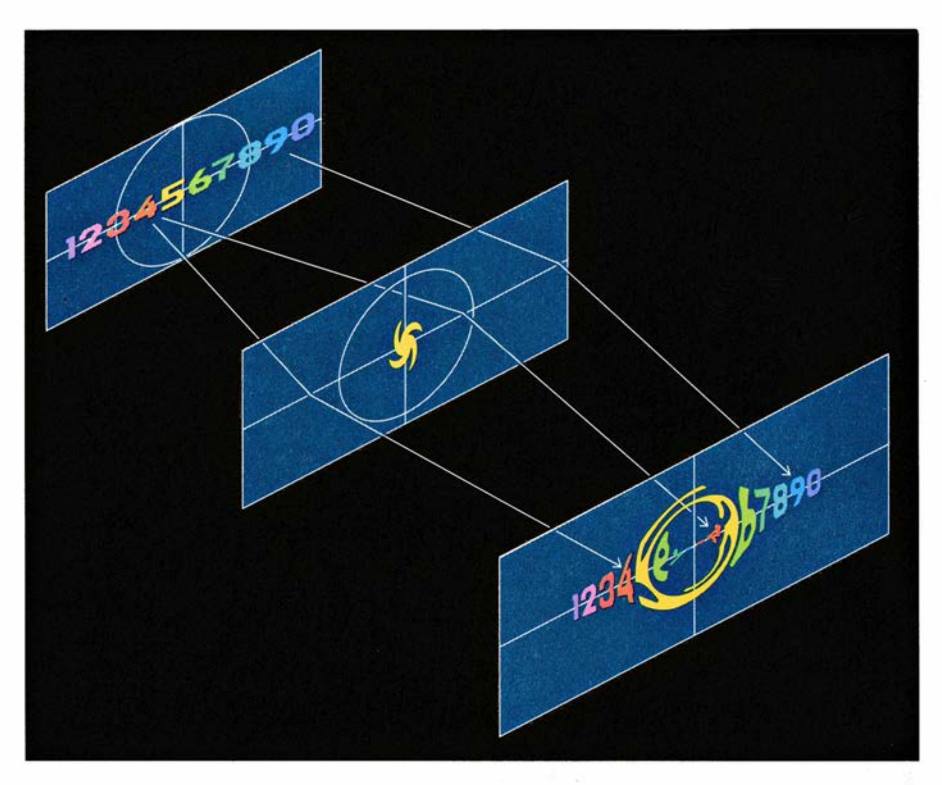
A lo largo de los casi 60 años transcurridos desde el descubrimiento de la expansión, los astrónomos han venido esforzándose por medir la "constante de proporcionalidad" que relaciona velocidad y distancia. La constante daría una medida directa del tamaño del universo y de su edad, el tiempo transcurrido desde la gran explosión. Para determinar la constante, necesitamos, sin embargo, conocer la distancia absoluta de objetos extragalácticos remotos. Una tarea difícil. En efecto, las técnicas tradicionales para medir distancias astronómicas se han mostrado incapaces de proporcionar un valor aceptable, a pesar de décadas de esfuerzo. Los mejores resultados difieren en un factor dos.

Las lentes gravitatorias ofrecen un nuevo camino para medir distancias astronómicas y, por tanto, la constante de proporcionalidad. A diferencia de todas las demás, la nueva técnica de búsqueda trabajará con idéntica eficacia con objetos remotos que con próximos. Es viable el cálculo de la geometría de un suceso de lente [*véase la figura 4*]. Tal análisis podría establecer que el trayecto de una de las imágenes es, por ejemplo, una milmillonésima más larga que el de la otra. La luz que viajara a lo largo de los dos caminos precisaría, pues, tiempos diferentes

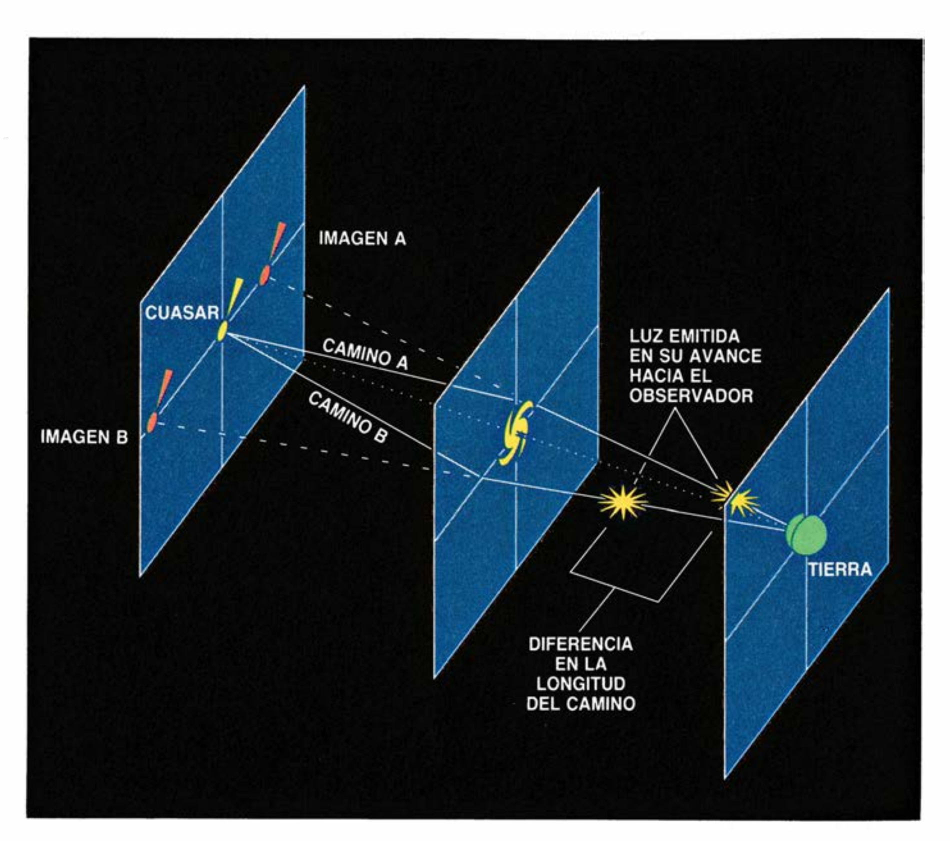
para alcanzar la Tierra. Si el cuásar variara bruscamente su brillo (algo que los cuásares hacen con frecuencia), observaríamos el destello en una imagen ligeramente más tarde que en la otra. La diferencia de longitud de los caminos es la diferencia de tiempos observados multiplicada por la velocidad de la luz. Por ser esta diferencia la milmillonésima de la distancia total, puede deducirse la distancia absoluta de la galaxia y del cuásar.

Las lentes gravitatorias encuentran su principal ámbito de aplicación en la tercera categoría de problemas: el estudio de la materia oscura del universo. Desde el trabajo pionero de Zwicky en los años 30, los investigadores han ido acumulando datos sobre los campos gravitatorios a gran escala, que son mucho más intensos que lo que cabría esperar de las estrellas observadas (luminosas) y del material interestelar. Ello se explicaría, a tenor de la opinión mayoritaria entre los astrónomos, sosteniendo que del 90 al 99 por ciento de la masa total del universo se debe a un componente sin detectar aún: la hipotética materia oscura. La investigación llevada a cabo sobre la emisión de bajo nivel y la absorción de radiación en un amplio rango de longitudes de onda no ha logrado todavía ninguna prueba directa de la existencia de esta materia oscura.

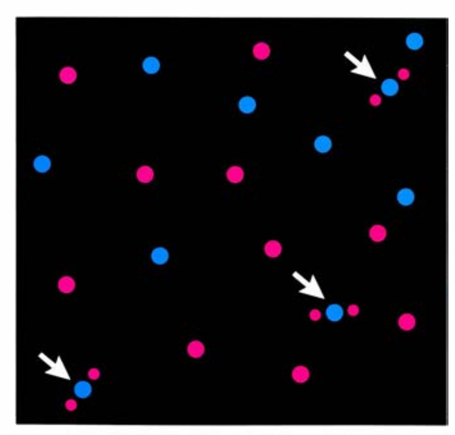
Al escapar a la observación directa, las propiedades de la materia oscura deben estudiarse por sus efectos gravitatorios; de ahí su conexión inmediata con los estudios de las lentes. Quizá la más sencilla de las observaciones importantes sea la frecuencia de los sucesos de lente. Desde un punto de vista estadístico, el número de sistemas lenticulares entre objetos situados a una determinada distancia sería proporcional a la densidad de objetos gravitantes del universo [*véase la figura 5*]. En la práctica, sin embargo, los límites observacionales —y destaquemos a este propósito el poder de resolución de los telescopios— restringen los tipos detectables de sucesos lenticulares: sólo se pueden estudiar los sistemas cuyos objetos lenticulares posean masa suficiente para producir imágenes distintas y resolubles. En otro orden, la misma búsqueda infructuosa de sucesos lenticulares proporciona una información valiosa, al limitar la densidad de cierta clase hipotética de lentes. Por ejemplo, la frecuencia observada de sistemas lenticulares elimina la posibilidad de grandes cantidades de galaxias oscuras masivas y agujeros negros.

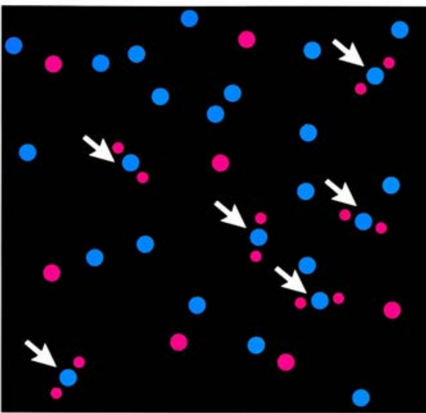


3. NUMEROS GIGANTES escritos en el cielo (*arriba, a la izquierda*) aparecerían distorsionados para un observador que se hallara instalado en la Tierra (*abajo a la derecha*) en virtud del campo gravitatorio de una galaxia intermedia. La luz incidente en una zona de impacto crítica (*círculo discontinuo*) formaría una imagen múltiple. Los números más próximos a la visual de la galaxia son los que sufren la mayor distorsión.



4. TECNICAS DE SONDEO de lentes gravitatorias cuya explotación permitiría medir la distancia absoluta de cuásares remotos. Un observador puede deducir la geometría del sistema lenticular a partir de la separación angular de las imágenes, la distribución de masa de la galaxia y la proporción entre las distancias de la galaxia y del cuásar (que se funda en la velocidad de corrimiento hacia el rojo, proporcional a la distancia). Supongamos que con este análisis se encuentra que el camino *B* es una milmillonésima vez más largo que el camino *A*. Si la imagen *B* tiene destellos dos años más tarde que la imagen *A*, la diferencia absoluta entre los caminos *A* y *B* sería de dos años-luz. Por tanto, el camino *A* sería de 2000 millones de años-luz.





5. MATERIA OSCURA DEL UNIVERSO. Podría sernos revelada en el sondeo de lentes gravitatorias. Los cuásares (*en color rosa*) sufrirían un proceso de lente a través de objetos oscuros (*en azul*), tanto más acusado cuanto mayor fuera la densidad de los objetos oscuros. Si existe un número reducido de objetos oscuros (*arriba*), habrá menos sucesos de lente (*flechas*) que los que habría si fueran muchos los objetos oscuros (*abajo*). Los telescopios pueden resolver estos sucesos de lente en la hipótesis única de que estén causados por objetos dotados de suficiente masa; por consiguiente, una población grande de objetos de escasa masa podría pasar inadvertida.

Estos ejemplos apenas si abren la lista de aplicaciones potenciales de las lentes gravitatorias. Su observación podría, en principio, permitir también una medida independiente de las masas galácticas y facilitar el estudio de la estructura espacial del medio intergaláctico. El aumento de una lente gravitatoria podría explicar por qué un número inesperadamente elevado de cuásares de alto corrimiento hacia el rojo se encuentran próximos a galaxias de bajo corrimiento hacia el rojo; la galaxia podría estar ampliando la imagen de un cuásar lejano, facilitando su observación. La ampliación de la imagen pudiera también dar cuenta de las siguientes entidades: cuásares que brillan de forma insólita o variable, objetos de tipo cuásar con un espectro de emisión peculiar y componentes de "luminosidad excesiva" en cuásares que parecen sobrepasar la velocidad de la luz. Las posibilidades están limitadas sólo por la agudeza de los teóricos.

Pero nos moveremos en un terreno provisional hasta que los astrónomos dispongan de una muestra estadística relevante de sucesos de lente. Y ellos a duras penas acaban de empezar el rastreo exhaustivo de sistemas lenticulares; la mayoría de los que conocemos se descubrieron por azar, sin especial significación estadística.

Reconociendo los beneficios potenciales de los estudios de las lentes gravitatorias, varios grupos han emprendido sondeos ambiciosos y esperan obtener muestras estadísticamente relevantes, así como sucesos que revistan interés especial. Algunos grupos se han centrado en el análisis minucioso de cuásares conocidos, prestando atención a los más distantes, fácilmente modificables por lentes de galaxias intermedias. Otros grupos extienden su búsqueda a cuásares desconocidos y otros objetos remotos. El autor está trabajando en un proyecto de este último tipo, en el que intervienen astrofísicos del Instituto de Tecnología de California, Observatorio Haystack, Instituto de Estudios Avanzados, Instituto de Tecnología de Massachusetts y Universidad de Princeton.

La mayor dificultad que estos sondeos deben afrontar reside en la rareza extrema de los sucesos lenticulares. De las clases conocidas de objetos astronómicos sólo los cuásares se hallan a distancia suficiente para ofrecer una probabilidad significativa de quedar alineados con un objeto más cercano. Incluso entre los propios cuásares, son raros los sistemas lenticulares: antes del primer descubrimiento al azar de un cuásar con lente en 1979, se habían catalogado ya 2000 cuásares. El análisis minucioso de los cuásares descubiertos podrá mejorar la proporción, pero probablemente en no mucho más del uno por ciento.

Para complicar la situación, no es tarea fácil distinguir un cuásar entre las múltiples estrellas de nuestra galaxia, con las que guarda un parecido superficial. Hemos de reconocer, sin embargo, que, desde que se descubrieron los cuásares, hace unos 25 años, se han desarrollado muchas técnicas innovadoras para su identificación. El primer paso a dar en el sondeo de lentes gravitatorias consiste, pues, en diseñar programas de observación que aporten muestras útiles de cuásares ordinarios. Diríase que, desde el comienzo, el estudio de las lentes gravitatorias se halla dificultado por la necesidad de encontrar una suerte de trébol cósmico de cuatro hojas.

Nuestra búsqueda de sistemas lenticulares comienza en longitudes de onda de radio. Por una primera razón: las estrellas ordinarias suelen constituir fuentes débiles de radioemisión, mientras que una gran proporción de radiofuentes brillantes está asociada a objetos extragalácticos, los cuásares entre ellos. Hay una segunda razón: los radioastrónomos tienen habitualmente a su disposición muchos de los instrumentos y técnicas más potentes de la astronomía. La alta resolución angular de los radiotelescopios revela la microestructura de un objeto, lo que es de una gran importancia para entender los sistemas lenticulares. Pero la concentración del esfuerzo en las radiofuentes impone un precio, pues sólo un pequeño porcentaje de cuásares son radiofuentes detectables. Ahora bien, las fuentes que no emiten radioondas, presentan idéntica oportunidad de producir el efecto de lente; por consiguiente, el filtrado exclusivo de los sondeos de radiofuentes permite la detección de sólo un pequeño porcentaje de sistemas lenticulares en el cielo.

El primer paso en el sondeo de radiofuentes se debe a un grupo del MIT, bajo la dirección de Bernard Burke, con el telescopio de 300 pies en Green Bank, instalado en el Observatorio Nacional de Radioastronomía (NRAO). Los investigadores inspeccionan grandes áreas del cielo, en busca de fuentes de radiación de longitud de onda de 6 centímetros y determinan su posición y brillo. Se han catalogado ya varios miles de estas fuentes.

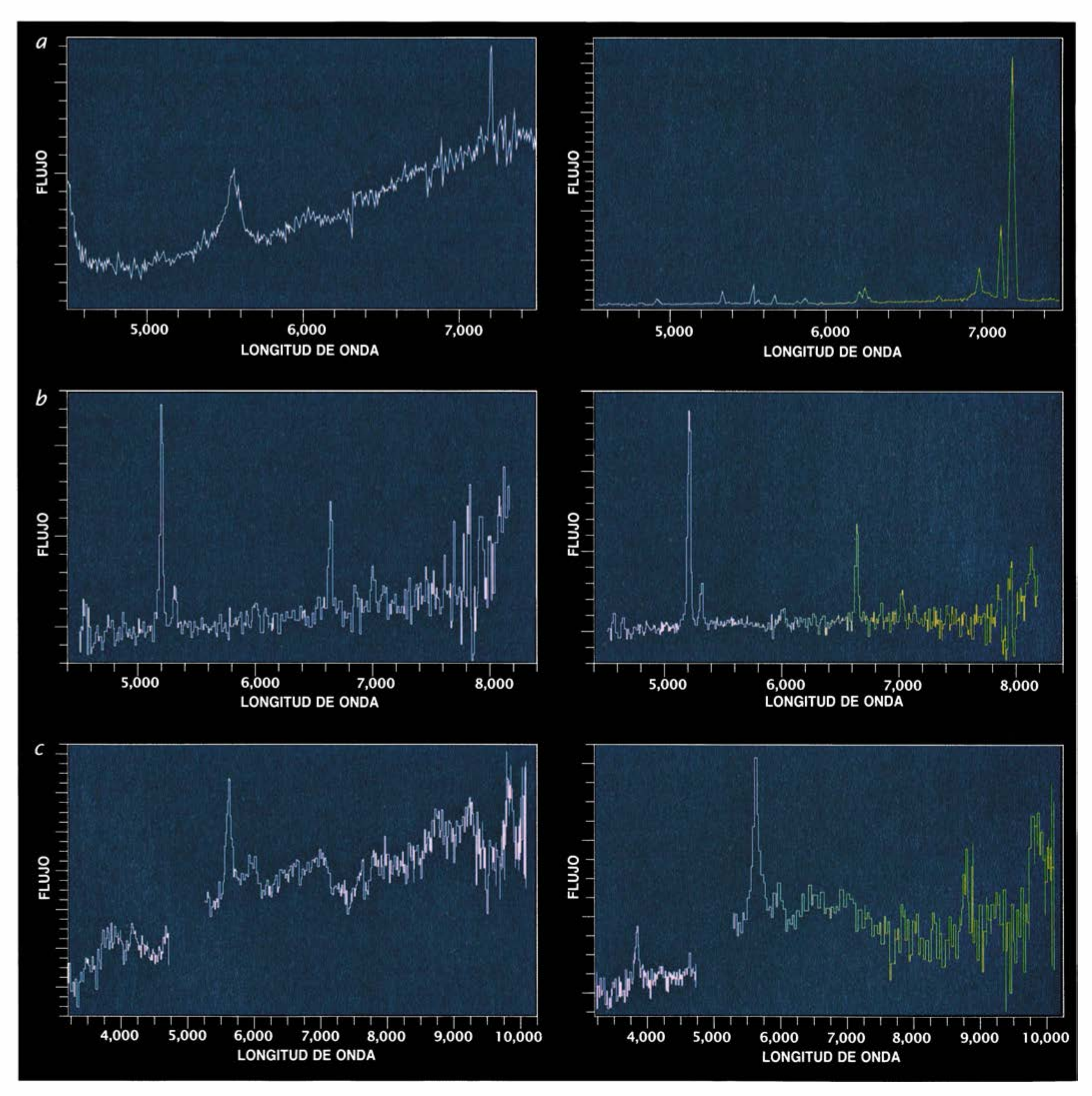
Escogimos entonces un subconjunto de las fuentes para observarlas con el "Gran Dispositivo" (VLA) del NRAO. El VLA, un radiotelescopio interferométrico, consta de 27 antenas de disco transportables, distribuidas en un área de unos 40 kilómetros de diámetro en una alta meseta de Nuevo México. Para determinadas misiones, el VLA es el radiotelescopio más potente del mundo: ofrece la valiosa posibilidad de obtener buenas imágenes de una radiofuente distante en tan sólo unos minutos de observación (usualmente, con 0,4 segundos de arco de resolución y una sensibilidad que abarca 50 órdenes de magnitud). De los 17 candidatos a convertirse en lente, cuatro se descubrieron gracias al VLA. De acuerdo con una extrapolación de los datos, nuestro proyecto acabará detectando de 10 a 30 buenos candidatos.

Una vez que el VLA ha tomado sus "instantáneas" de las fuentes seleccionadas, se inspeccionan las imágenes de radio. Incluso las radiofuentes ordinarias adoptan muchas formas: desde puntos de apariencia estelar hasta cho-

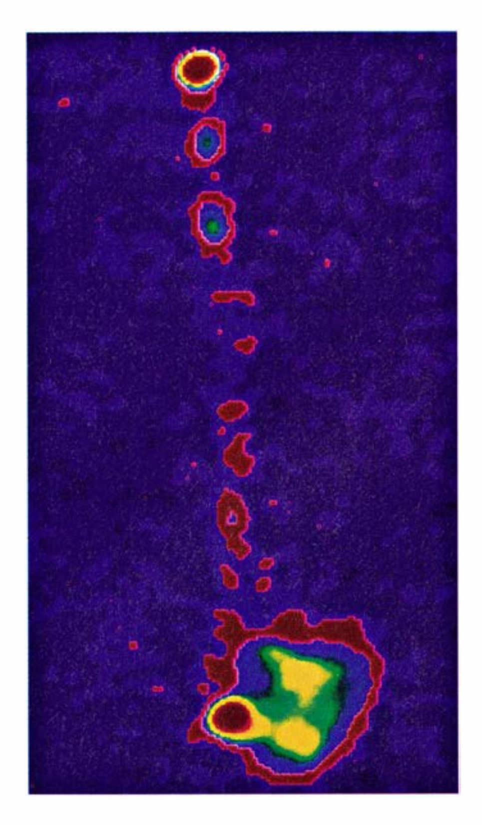
rros de plasma que emanan de una fuente central, pasando por estructuras caóticas de difícil caracterización. El problema consiste en sacar verosímiles lentes gravitatorias de este variopinto zoo cósmico. Hay un truco para ello: saber que la mayoría de las radiofuentes normales muestran solo una componente sencilla brillante sin resolver. Si esta fuente sufre un proceso intenso de lente gravitacional, aparecerán dos o más imágenes de aquel punto sencillo. En particular, los buenos candidatos muestran más de dos de estos componentes separados por 10 segundos de arco escasos. (Mayores distancias no serían plausibles, ante la enorme masa de la lente que se requeriría.) Las fuentes cuyas componentes prefieren la disposición en arco a la configuración en línea recta son también sospechosos idóneos, porque las lentes pueden producir distorsiones curvas. (El ejemplo ideal sería el propio anillo de Einstein.)

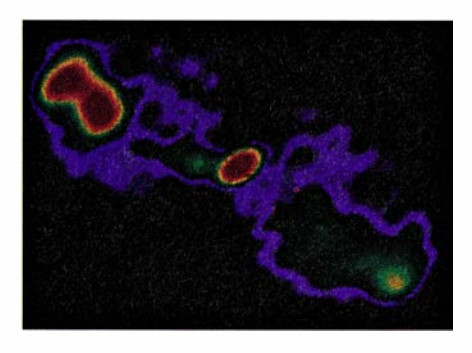
La búsqueda sigue entonces con las observaciones ópticas. La teoría de la relatividad general predice que la deflexión gravitatoria de la radiación es independiente de la longitud de onda; así, pues, si un efecto de lente produce imágenes múltiples de una fuente en longitudes de onda de radio, creará análogamente imágenes múltiples en longitudes de onda ópticas. En ese sentido, el detector de alta sensibilidad inspecciona las radiofuentes para obtener una imagen óptica que se comparará con la imagen de radio.

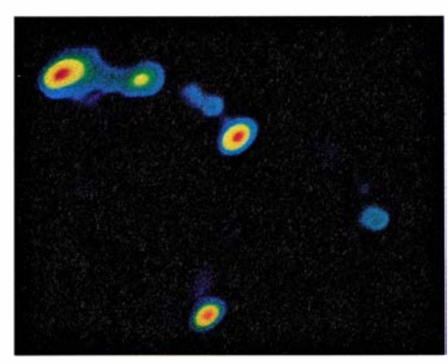
Estas observaciones se llevan a cabo con un detector extremadamente sensible: el "dispositivo de carga acopla-



6. HUELLAS DACTILARES ESPECTRALES. A ellas se recurre para comprobar si los pares de objetos celestes son, de hecho, imágenes múltiples de lente gravitatoria. Los pares con espectros diferentes (*a*) son, casi con certeza, de distinta naturaleza física. Los pares con espectros más o menos idénticos (*b*) son, a buen seguro, resultado de una lente. En muchos casos, como en el par 1146 + 111 (*c*), los resultados son ambiguos. Las mediciones realizadas a longitudes de onda entre 5000 y 7000 angstrom guardan un sorprendente parecido; el objeto se nos ofrece como una lente muy verosímil. Ello no obstante, mediciones posteriores, en otras longitudes de onda, pusieron de manifiesto diferencias significativas, cuestionando así la hipótesis anterior. (Ilustración de Joe Lertola.)







7. TRES IMAGENES DE RADIO: ¿Cuál de ellas es el resultado de una lente gravitatoria? Las dos de arriba (1007 + 417 y 2355 + 490) son chorros nucleares normales que no sufrieron proceso de lente; se trata, pues, de objetos de apariencia puntual que eyectan flujos gigantes de plasma. Abajo se encuentra el sistema de lente gravitatoria 0957 + 561, descubierto en 1979. Una parte de un cuásar se ha multiplicado dando lugar a dos componentes de apariencia puntual alineados verticalmente en el centro. La galaxia lente, que es además radiofuente, aparece en forma de mancha azul débil encima de la imagen inferior; en las observaciones ópticas, la galaxia se aprecia con toda nitidez. Los tres mapas de brillo fueron obtenidos con el "Gran Dispositivo" (VLA).

da" (CCD, por sus iniciales inglesas), instalado en el foco primario del telescopio Mayall de cuatro metros del Observatorio Nacional de Astronomía Optica en Kitt Peak. El CCD permite a este telescopio –el tercero en tamaño de los Estados Unidos– detectar, en unos 30 minutos de exposición por fuente, objetos por lo menos 16 millones de veces más débiles que la estrella visible más tenue que el ojo humano pueda alcanzar.

Obtenida la imagen óptica, se la compara con la radioimagen. En algunos casos, no se apreciará contrapartida óptica de la radiofuente; en la mayoría, sin embargo, habrá un objeto óptico asociado a la fuente. En algunas ocasiones, ocurrirá que dos o más de los componentes de radioonda presentará su contrapartida óptica. Tendremos en ese momento la pista de una posible lente. Así es como las observaciones ópticas criban la lista de candidatos VLA de lentes y la reducen al catálogo de primeros sospechosos.

Las fuentes que sobreviven a este proceso de filtrado se someten a una prueba crítica final. Se toman las "huellas dactilares" de cada componente de una imagen múltiple, a través del análisis de su espectro óptico, que determina el brillo aparente para múltiples longitudes de onda. Los pormenores del espectro óptico se determinan mediante una compleja combinación de muchas propiedades físicas –la distancia de la fuente, su movimiento espacial, la temperatura, la densidad, la composición química, etcétera–. La prueba espectroscópica distinguirá, por tanto, entre las imágenes múltiples reales causadas por un efecto de lente (que poseerán un espectro idéntico) y las imágenes de objetos similares, aunque físicamente distintos, disfrazados de sistema lenticular.

Esta sería, en principio, una prueba de fuego, toda vez que resulta improbable que dos objetos independientes coincidan en todas sus propiedades físicas. En la práctica, sin embargo, la situación no es tan tajante. En primer lugar, resulta difícil, cuando no imposible, obtener un buen espectro de objetos débiles separados por sólo unos pocos segundos de arco. En algunos casos, la tarea consumió una noche de observación en Kitt Peak o en monte Palomar. Segundo, hay cuásares diferentes que tienen espectros bastante parecidos, ya sea por pura casualidad o porque guarden alguna suerte de parentesco. Peor todavía, ciertos efectos, como el aumento no uniforme de la lente, pueden producir pequeñas aberraciones en los espectros de las imágenes. El análisis espectral se convierte así en un cotejo de firmas emborronadas, sin nada que ver con la comprobación de huellas dactilares. Más aún. Si los espectros de dos o varios componentes ópticos ofrecen cierta coherencia o afinidad, el objeto adquiere idoneidad suficiente para merecer la atención de las revistas profesionales.

Una vez que la presunta lente se ha identificado mediante alguno de los sondeos, recibe la debida atención de los expertos, que la estudian para comprobar si se trata de un verdadero sistema lenticular. En caso afirmativo, se impone su reconstrucción mediante un modelo detallado. Uno de los estudios posteriores prioritarios será el relativo al reconocimiento de dicha lente. Se intenta, además, conseguir imágenes de la mayor resolución posible en el rango más dilatado de longitudes de onda, que permitan acotar ciertos modelos teóricos. Entre la captura de un objeto lenticular y la obtención de nuevos datos de distinta índole, el candidato puede recabar para sí la décima parte del tiempo de observación requerido para el rastreo exhaustivo del que se le extrajo.

La primera campaña de sondeos de lentes no ha terminado todavía. Siguen apareciendo nuevas clases de ellas. De ahí una pregunta obvia: ¿cuántas lentes se han encontrado ya? La dificultad que entraña poder responder a esta cuestión resalta el problema fundamental de los estudios de lentes. De las 17 presuntas lentes que han ocupado las páginas de la bibliografía especializada, sólo cinco han resistido subsecuentes observaciones. Tres se les supone casos hipotéticos, con una probabilidad por debajo del 50 por ciento de que sean lentes reales. En las nueve restantes, la información es muy insegura y no permite adoptar un criterio decidido para inclinarse en cualquiera de los dos sentidos.

Alguien podría llegar a la conclusión de que se ha cumplido muy poco de cuanto promete este campo de investigación. El trabajo realizado no ha rendido un valor claro de la constante de proporcionalidad, ni de otros parámetros cosmológicos fundamentales. Ahora bien, se han conseguido interesantes resultados sobre la materia oscura, su distribución en objetos específicos y los límites sobre su abundancia total en formas específicas. Se ha establecido, en ese sentido, que no hay

muchos agujeros negros de masa galáctica. (Se trata de resultados útiles, aunque, hasta la fecha no han hecho más que confirmar conclusiones preexistentes o hipótesis dadas por ciertas. Así, podemos averiguar la distribución de la masa oculta de una galaxia estudiando su rotación.) Al menos en uno de los sistemas (2016 + 112), el sueño de Zwicky del telescopio cósmico se ha cumplido, permitiendo la inspección de un cuásar peculiar que, de otro modo, hubiera sido demasiado débil como para detectarse. La lista actual de logros científicos, aunque modesta, no es desalentadora, sobre todo si advertimos el estado de desarrollo en que se encuentra el tema.

Sigue siendo objeto de debate el valor de los estudios de las lentes gravitatorias. En el mundo ideal en que se mueve la teoría astrofísica podemos soñar con aplicaciones, elegantes y poderosas, de las lentes en cuestiones fundamentales. En el mundo real de la complejidad e información limitada sobre ellos, no todas las aplicaciones potenciales se materializarán. Las dificultades son inherentes a la naturaleza de las lentes gravitatorias. Proceden, justo es reconocerlo, de los propios efectos de los que debieran informarnos las lentes. Por ejemplo, las imágenes encierran datos sobre la distribución de la masa total de la galaxia lente y de las propiedades medias a gran escala del universo. Nos gustaría conocer ambos efectos; pero se hace difícil pronunciarse sobre uno sin saber nada de antemano sobre el otro. A pesar de estos formidables obstáculos, las aplicaciones de las lentes gravitatorias continuarán, aunque tan sólo sea para ofrecer una nueva herramienta a la hora de abordar problemas fundamentales, que han venido quedando fuera del alcance de las herramientas tradicionales.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

QUASARS AND GRAVITATIONAL LENSES. PROCEEDINGS OF THE 24TH LIÈGE ASTROPHYSICAL COLLOQUIUM. Dirigido por Jean P. Swings. Presses Universitaires de Liège, 1983.

QUASARS AND GRAVITATIONAL LENSES. Edwin L. Turner en *Science*, vol. 223, n.° 4642, págs. 1255-1259; 23 de marzo de 1984.

GRAVITATIONAL LENSES AS TOOLS IN OBSERVATIONAL COSMOLOGY. Claude R. Canizares en *Observational Cosmology*, dirigido por Adelaide Hewitt, Geoffrey Burbidge y Li Zhi Fang. D. Reidel Publishing Co., 1987.

Hormonas hematopoyéticas

La obtención, por métodos de ADN recombinante, de hormonas que regulan la producción de células sanguíneas promete revolucionar la práctica médica

David W. Golde y Judith C. Gasson

Dice el Levítico que "la vida de la carne está en la sangre". Dejando de lado su significado metafórico, la aseveración resulta literalmente cierta: todos los tipos de células sanguíneas son necesarios para la vida. Los eritrocitos (glóbulos rojos o hematíes) transportan el oxígeno hasta los tejidos. Los leucocitos (glóbulos blancos) defienden el cuerpo frente a organismos patógenos y tumores. Hasta hace poco, eran escasos los medios disponibles para potenciar la actividad de las células de la sangre: las vacunas y una alimentación adecuada aumentan las defensas inmunológicas y las transfusiones pueden subsanar las pérdidas de glóbulos rojos. Pero en los últimos años se ha descubierto un grupo de hormonas que podrían alterar radicalmente esa situación. Se trata de los factores proteicos de crecimiento que han dado en llamarse hormonas hematopoyéticas, o hemopoyetinas (del griego *αἷμα*, sangre y *ποιέω*, fabricar).

En efecto, son hormonas productoras de sangre. Todos los tipos de células sanguíneas proceden de una misma célula madre. Cada hemopoyetina estimula la fabricación de series específicas de células sanguíneas y las "apresta", intensificando su función. Desde el reciente logro de la clonación de los genes que codifican algunas de esas hemopoyetinas, pueden fabricarse esas substancias en grandes cantidades y pronto resultará habitual que los médicos induzcan la producción de células sanguíneas en la práctica terapéutica. Ello quizá reduzca notablemente la necesidad de practicar transfusiones de sangre, simplifique los transplantes de médula y reduzca el riesgo que entrañan; igualmente habrá de posibilitar el reforzamiento del sistema inmunitario en su lucha contra organismos patógenos, tumores o enfermedades como la del SIDA. En resumen, las hemopoyetinas podrían desencadenar en la práctica médica una revolución comparable a la que se registró, hace ahora medio siglo, con la introducción de los antibióticos.

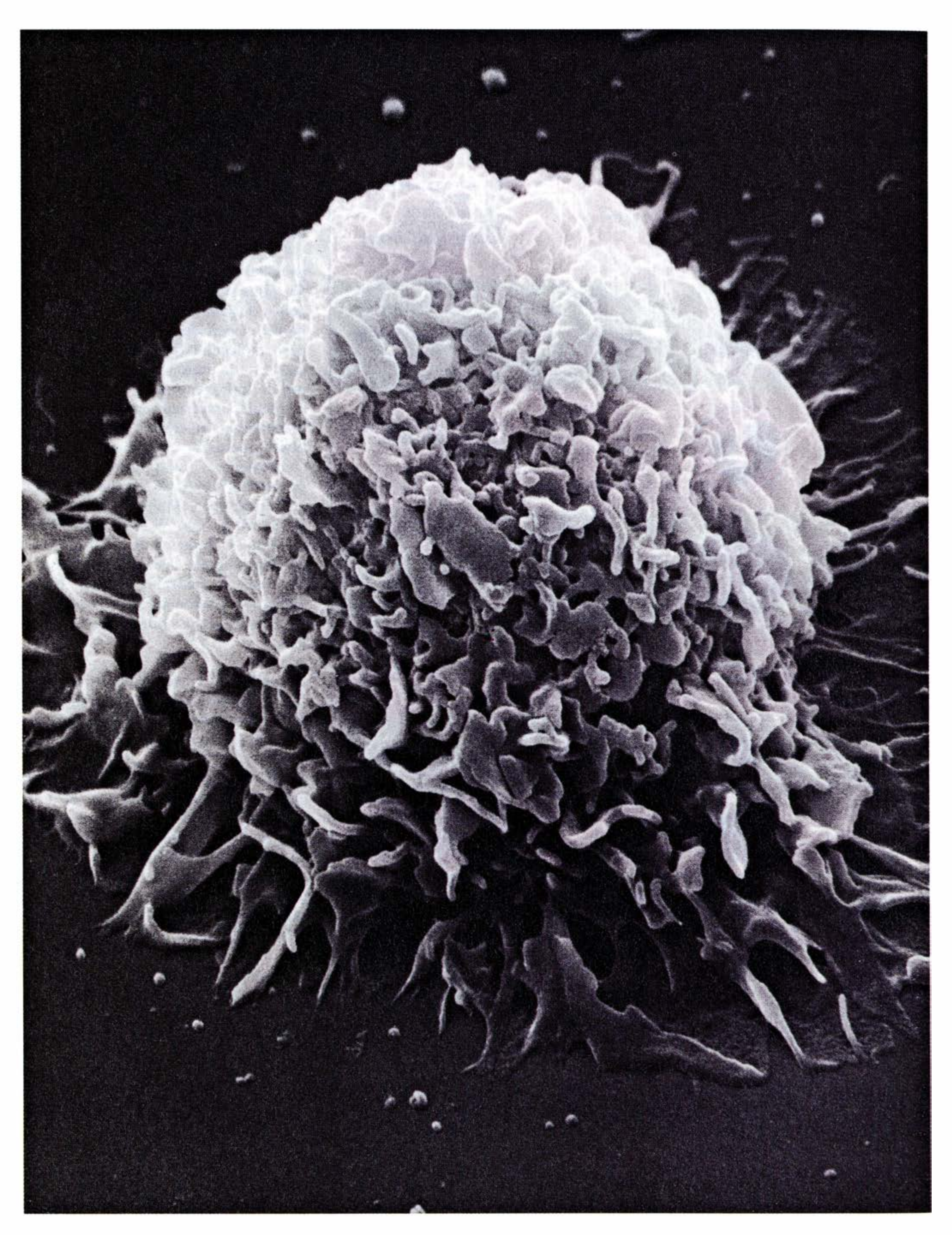
DAVID W. GOLDE y JUDITH C. GASSON, de la facultad de medicina de la Universidad de California en Los Angeles, colaboran en la investigación de factores estimuladores de colonias. Golde es jefe de la división de hematología-oncología, director del centro del SIDA de la Universidad de California en Los Angeles y director del centro de investigación clínica general de esa misma institución. Glasson, profesora auxiliar de medicina, es directora asociada de la División que encabeza Golde.

Sólo existe un tipo de glóbulos rojos. Bajo la denominación común de glóbulos blancos se distinguen, sin embargo, tres linajes celulares, cada uno de los cuales desempeña una función específica: granulocitos, monocitos y linfocitos. A su vez, los primeros se subdividen en tres tipos de células: neutrófilos, eosinófilos y basófilos, apelativos que remiten al tipo de tinción por el que cada uno presenta mayor afinidad. Los neutrófilos son fundamentales en la defensa del organismo frente a las bacterias y algunos hongos. Los eosinófilos intervienen en la lucha contra los parásitos, como las lombrices o los protozoos. Se conoce peor la función de los basófilos. Los monocitos (y sus parientes los macrófagos) son esenciales en la defensa frente a parásitos intracelulares como los virus y ciertas bacterias. Los linfocitos intervienen en el reconocimiento y destrucción de muchos tipos de agentes patógenos.

¿Cómo se desarrolla, de un solo precursor, ese abanico celular? El proceso es similar al trazado de un árbol genealógico: a través de una serie de generaciones, los descendientes van apartándose de la célula madre indiferenciada. La mayor parte del proceso tiene lugar en la médula ósea, donde se encuentran las células madre. Cuando una de estas células se divide, origina otra célula progenitora o bien queda obligada a seguir el curso de una vía de desarrollo. No se conocen los mecanismos que controlan la "decisión" de la célula progenitora a la hora de generar una serie específica de células. Por supuesto, en el proceso interviene la expresión de ciertos genes, pero está por aclarar aún si se trata de un suceso aleatorio o si depende de factores ambientales.

En cualquier caso, fruto de la determinación, la célula madre crea receptores en su superficie que responden al estímulo de señales hormonales específicas. A su vez, esas señales inducen a la célula a seguir una vía de desarrollo que va especializándola. En la primera bifurcación importante del árbol se separan los precursores de los linfocitos de los precursores de los demás tipos celulares. En esta fase, las células, pese a estar determinadas, no se distinguen por su morfología. Conforme avanza el proceso, aparecen los primeros precursores identificables, entre ellos los eritroblastos (precursores de los eritrocitos) y los mieloblastos (precursores de los granulocitos y de los monocitos).

Mucho más difícil que trazar el árbol genealógico de las células sanguíneas resulta explicar la regulación a que está sometido el proceso. La vía de producción de eritrocitos maduros fue la primera que se estudió: hoy se conoce bien. A principios de este siglo se postuló la existencia, en la sangre, de alguna sustancia reguladora de la síntesis de glóbulos rojos. Puesto que la función de los eritrocitos es el transporte del oxígeno, parecía lógico que su producción guardara una relación estrecha con las necesidades de oxígeno que tuviera el organismo. Kurt R. Reissmann, de la escuela médico-militar de las Fuerza Aéreas de los Estados Unidos, obtuvo pruebas directas de la existencia de un "factor" circulante que es-



1. MACROFAGO, glóbulo blanco que desempeña un papel fundamental en la repuesta inmunitaria. Célula móvil que se presenta en muchos tejidos, fagocita (ingiere) los organismos patógenos y los residuos. Los "rizos" de la superficie de la célula le sirven para la locomoción, para extenderse y para fagocitar. El macrófago es una de las células que liberan factores de estimulación de las colonias (CSF); estas hormonas inducen la proliferación y la maduración de los glóbulos blancos. Esta micrografía, realizada por Shirley G. Quan en el laboratorio de los autores, muestra un macrófago aumentado unas 9000 veces.

CELULA DE LA SANGRE	VIDA MEDIA EN LA SANGRE	FUNCION
ERITROCITO	120 DIAS	TRANSPORTE DE OXIGENO
MONOCITO	3 DIAS	DEFENSA DEL HUESPED, VIGILANCIA INMUNOLOGICA, (PRECURSOR DEL MACROFAGO HISTICO)
NEUTROFILO	7 HORAS	DEFENSA DEL HUESPED
EOSINOFILO	?	DEFENSA DEL HUESPED CONTRA PARASITOS, ALERGIAS
BASOFILO	?	INFLAMACION Y ALERGIA
PLAQUETAS	7-8 DIAS	COAGULACION SANGUINEA
LINFOCITO *T*	?	INMUNIDAD CELULAR
LINFOCITO *B*	?	DEFENSAS ANTICORPORALES (PRECURSOR DE LA CELULA PLASMATICA)

2. CELULAS DE LA SANGRE. Se distinguen muchos tipos, que desempeñan funciones específicas de cada uno. El eritrocito es el glóbulo rojo, al que corresponde el transporte del oxígeno; las demás células son leucocitos (glóbulos blancos). Algunos monocitos abandonan el torrente sanguíneo y se transforman en macrófagos en los tejidos. El neutrófilo, el eosinófilo y el basófilo constituyen subtipos de granulocitos.

timulaba la eritropoyesis (producción de glóbulos rojos) en respuesta a los cambios de los niveles de oxígeno en la atmósfera y en los tejidos.

Reissmann conectó entre sí los sistemas vasculares de dos ratas y expuso una de ellas a niveles bajos de oxígeno; en la otra se detectó también un estímulo de la producción de eritrocitos, señal de que alguna sustancia presente en la sangre había pasado de un animal a otro. Las observaciones de Reissmann, y otras, sirvieron de base para los estudios de Allan J. Erslev, de la Facultad de Medicina de Jefferson. Erslev y sus colaboradores provocaban anemia en conejos haciéndoles perder sangre. La inyección del plasma (líquido de la sangre sin células) de animales anémicos en conejos normales estimulaba la eritropoyesis.

Los años que siguieron al experimento de Erslev asistieron a numerosos avances en el conocimiento de la sustancia estimuladora de la producción de glóbulos rojos. Se descubrió que se sintetizaba en los riñones, que circulaba por el plasma y que se excretaba en la orina. En cultivos de laboratorio instaba la incorporación de hierro en los precursores eritrocíticos en desarrollo y activaba el crecimiento de las colonias de glóbulos rojos. Pese a esos adelantos sobre los efectos del factor, no resultaba fácil aislar la molécula, por la razón principal de que su concentración en los fluidos corporales era muy baja. Por fin, en 1977, Takaji Miyake y Eugene Goldwasser, de la Universidad de Chicago, consiguieron aislar la eritropoyetina, como se llamó al factor; si bien sólo lograron obtener unos miligramos, muy pocos, de los 2500 litros de orina humana analizada.

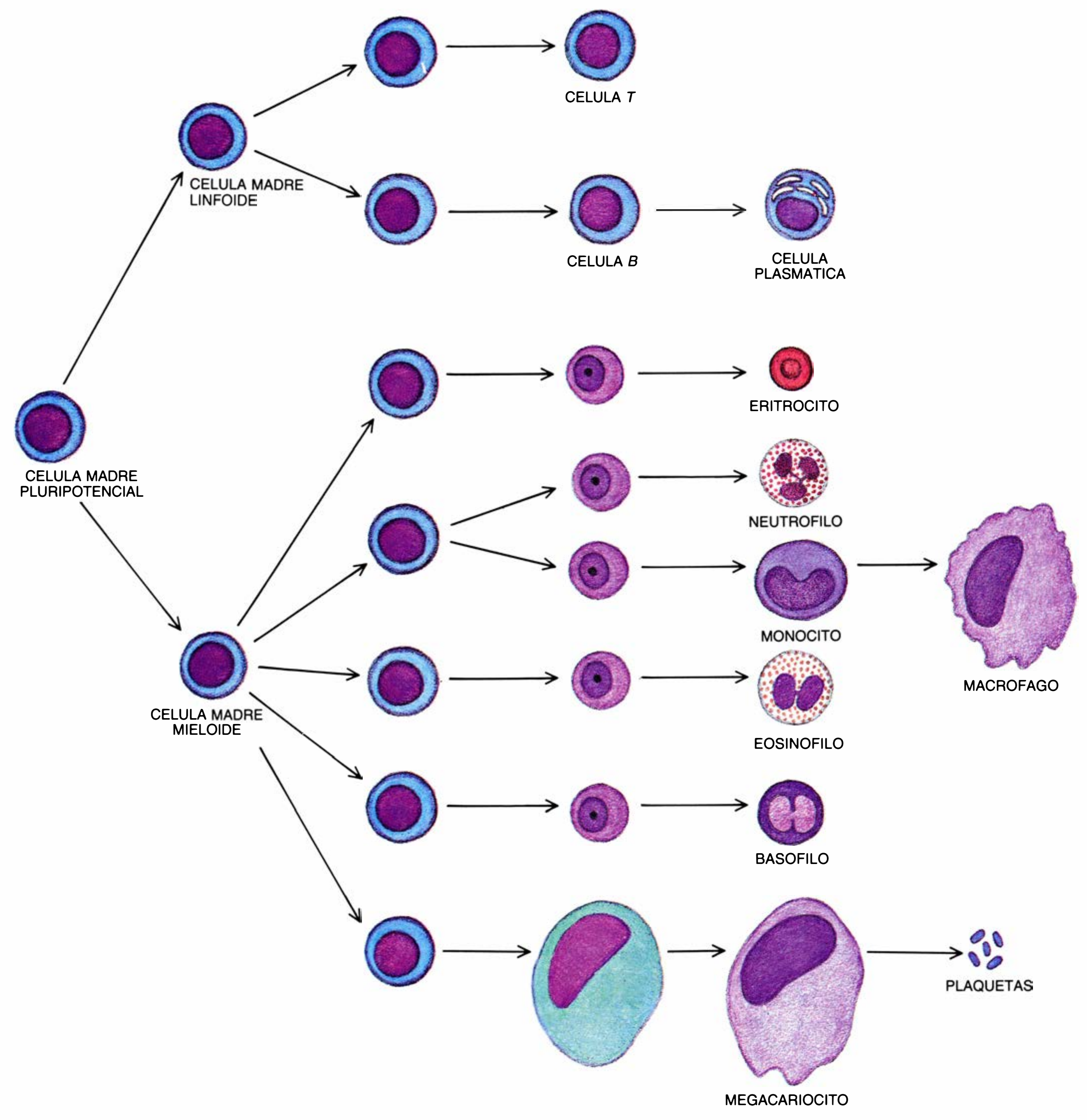
Con la molécula aislada, las investigaciones progresaron con paso rápido. En poco tiempo, bioquímicos de Amgen y de Genetics Institute, Inc., clonaron el gen de la eritropoyetina. El peso molecular de la hormona purificada era de unos 34.000 dalton (el átomo de hidrógeno pesa un dalton) y la molécula sintetizada en el laboratorio presentaba los efectos que se habían observado en la sustancia natural. Recientemente, se han aprovechado esas propiedades en ensayos clínicos con la eritropoyetina sintética. Joseph W. Eschbach y John W. Adamson, de la facultad de medicina de la Universidad de Washington, han administrado la hormona a enfermos renales graves obligados a eliminar de la sangre los desechos y toxinas por medio de la diálisis.

La diálisis corrige la mayoría de los problemas causados por la insuficiencia renal grave, salvo la anemia (reducción del número de eritrocitos de la sangre), que aparece al disminuir los niveles de eritropoyetina y que puede exacerbarse por la presencia de inhibidores y de toxinas circulantes que interfieren con el efecto de la hormona. El trabajo de Eschbach y Adamson demuestra que, incluso ante esos inhibidores, la eritropoyetina sintética es funcional y normaliza el recuento sanguíneo de hematíes. Se ha ensayado el tratamiento en más de 300 enfermos dializados y en la mayoría se ha comprobado un aumento significativo de la producción de eritrocitos.

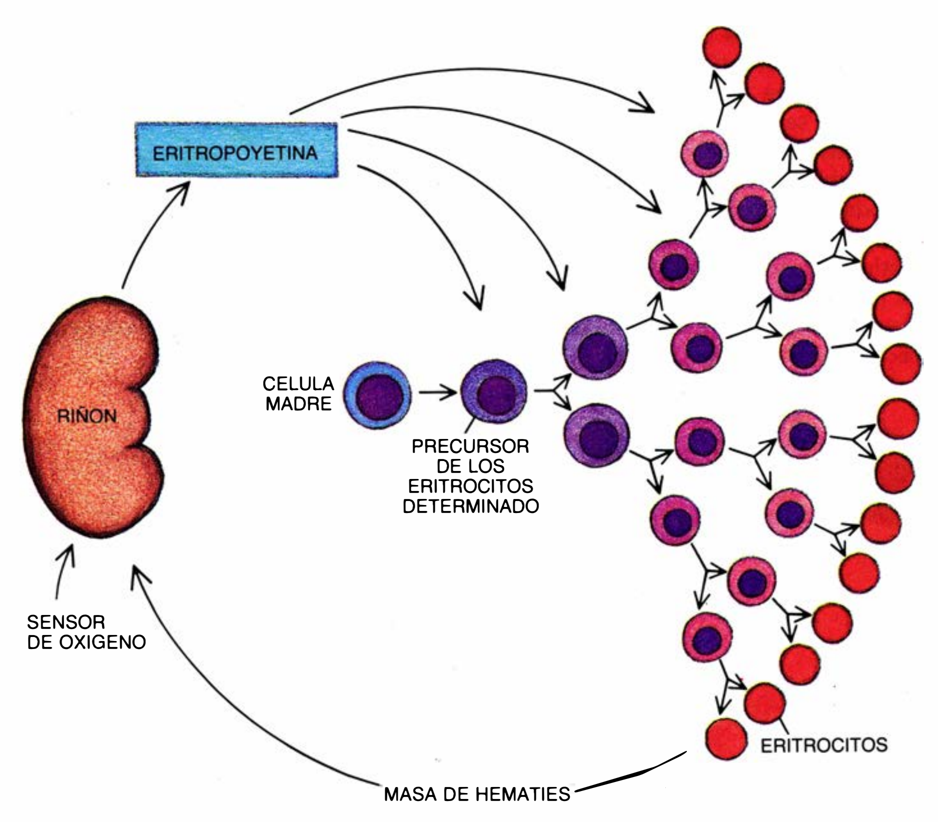
La insuficiencia renal no será la única enfermedad que admita la aplicación terapéutica de la eritropoyetina. La introducción de la hormona modificará radicalmente el funcionamiento de los bancos de sangre. Dado que, teóricamente, la eritropoyetina puede decuplicar la producción de glóbulos rojos, se reducirá significativamente la necesidad de transfusiones. Los pacientes quirúrgicos requerirán menos transfusiones, gracias a la capacidad de esta hormona para estimular en ellos la producción de hematíes; podrán reservar su propia sangre y recibir eritropoye-

tina antes, durante y después de la operación. En el futuro, la hormona posibilitará la producción de glóbulos rojos en los bancos de sangre, transformándolos, por tanto, en centros de fabricación y de almacén. Asimismo, se utilizará la eritropoyetina para reponer los niveles de eritrocitos en los enfermos de cánceres de las células de la sangre o en los que, por padecer algún otro tipo de cáncer, estén sometidos a quimioterapia.

Determinar los efectos de la eritropoyetina no constituía, en modo alguno, una tarea fácil, pero sí resultaba algo más sencillo que aclarar los mecanismos que regulaban la producción de glóbulos blancos. A principios de la década de 1960 se habían estudiado ya las características del desarrollo de los distintos tipos de leucocitos a partir de su precursor común. Pero no se conocían los factores que influían sobre cada serie de células. Y ello, en parte, porque hasta hace algo más de 20 años no se logró cultivar con éxito células de la médula ósea humana en un medio artificial. En 1966 cambió la situación, gracias al descubrimiento, independiente y casi simultáneo, de Dov H. Pluznik y Leo Sachs, del Instituto Weizmann de Ciencias de Israel, y de Thomas R. Bradley, de la Universidad de Melbourne, y Donald Metcalf, del Instituto australiano de Investigación Médica Walter y Eliza Hall.



3. MADURACION DE LAS CELULAS SANGUINEAS. Sigue un patrón que recuerda los árboles genealógicos. La célula madre pluripotencial, precursora de todos los tipos maduros, se encuentra en la médula ósea. El primer paso de la maduración de las células sanguíneas es la división en dos series principales: la linfoide (constituida por los linfocitos) y la mieloide (eritrocitos y el resto de los leucocitos). Posteriormente, bajo la influencia de determinadas señales proteicas, las células precursoras van convirtiéndose, paso a paso, en un tipo celular maduro, proceso que se desarrolla en su mayor parte en la propia médula.



4. ERITROPOYETINA, la hormona que estimula la proliferación y la maduración de los precursores de los glóbulos rojos. El riñón la produce en respuesta al contenido de oxígeno de la sangre. Bajo la influencia de la eritropoyetina, los precursores de los eritrocitos reducen su tamaño, producen más hemoglobina (la sustancia que se une a la molécula de oxígeno) y, en última instancia, acaban perdiendo el núcleo.

Según encontraron esos dos equipos de investigadores, a partir de suspensiones que contenían células de médula ósea de ratones se podían obtener colonias de glóbulos blancos maduros. Cada colonia constituía un clon, es decir, estaba formada por descendientes, genéticamente idénticos, de un mismo precursor. El funcionamiento del procedimiento dependía de que en el recipiente de cultivo hubiera sustratos "alimentadores" que indujeran la formación de colonias y las mantuvieran. Primero esos sustratos contenían suspensiones de diversos tipos de células; luego se comprobó que la presencia de esas células resultaba superflua: bastaba con aportar el medio "acondicionado" en el que habían crecido los sustratos alimentadores. Constituyó ese avance un paso decisivo, pues evidenció que en el medio acondicionado había sustancias capaces de estimular la división y la maduración de los glóbulos blancos; posteriormente, a esas sustancias se les llamó factores estimuladores de colonias (o CSF, por *colony-stimulating factors*).

¿Qué eran los CSF y de dónde procedían? Se empezó atacando la segunda cuestión. Los primeros trabajos se habían realizado en su mayor parte con médula ósea de ratón, pero en 1970 el refinamiento de los sistemas utilizados permitía cultivar de modo rutinario leucocitos humanos. Los adelantos se debieron principalmente a los trabajos de William Robinson, de la Universidad de Colorado, Norman N. Iscove, de la de Toronto, y Paul A. Chervenick, de la facultad de medicina de la Universidad de Pittsburgh, que desarrollaron técnicas de cultivo de colonias de células mieloides humanas (el linaje que incluye a eritrocitos, monocitos y granulocitos). En su método se utilizaban sustratos alimentadores que contenían leucocitos humanos o un medio acondicionado por exposición a esos tipos celulares.

El descubrimiento de que los leucocitos humanos liberaban CSF alentó la búsqueda de esa "célula estimuladora de las colonias" en sangre periférica, considerada la fuente de las hormonas. El primer fruto de la búsqueda consistió en identificar el monocito como el leucocito sanguíneo responsable principal de la liberación de CSF; el hallazgo fue obra de Chervenick y Al F. LoBuglio, de la Universidad estatal de Ohio, e, independientemente, de Martin J. Cline, de la facultad de medicina de la Universidad de California en San Francisco, y uno de nosotros (Golde). Más tarde comprobamos que el macrófago (un descendiente del monocito que no suele encontrarse en la sangre, sino en los tejidos) también liberaba CSF. Más recientemente aún, se ha demostrado que las células de la serie monocito-macrófago elaboran sustancias que pueden inducir la liberación de CSF por otras células; entre esas sustancias figurarían la interleucina-1 (IL-1) y el factor de necrosis tumoral (TNF). Tales descubrimientos presentan al macrófago como un centinela, que reacciona a la invasión microbiana y envía señales que aumentan la producción de glóbulos blancos.

Monocitos y macrófagos no son los únicos glóbulos blancos productores de CSF. Estudios posteriores demostraron que los linfocitos activados liberaban también un potente CSF. Los linfocitos se presentan, al menos, en dos tipos celulares: los linfocitos *T* y los linfocitos *B*, que desempeñan funciones diferentes. Algunos linfocitos *B* acaban diferenciándose en células plasmáticas, que fabrican grandes cantidades de anticuerpos. Los linfocitos *T* llevan a cabo múltiples funciones, incluida la de comportarse como una especie de célula "maestra" que dirige de forma precisa diversos aspectos de la respuesta inmunitaria. Dentro de ese cometido, los linfocitos *T* producen y liberan factores estimuladores de colonias. Cuando se ven expuestos a antígenos específicos, liberan CSF que, a su vez, controlan la producción de los glóbulos blancos.

A medida que avanzaba la década de 1970 fueron revelándose algunas de las fuentes productoras de factores estimuladores de colonias. Sin embargo, seguía sin averiguarse la naturaleza de esas sustancias. Los primeros indicios al respecto se obtuvieron con el sistema de ensayo de colonias de médula ósea de ratón descrito, que permitió identificar cuatro CSF diferentes. E. Richard Stanley y Metcalf descubrieron el primero de ellos: se trataba de un factor que sólo actuaba sobre colonias de la serie monocito-macrófago, por lo que se denominó CSF de macrófagos (M-CSF). Posteriormente se identificaron otros tres: uno de ellos estimulaba colonias de granulocitos y de monocitos, y se denominó GM-CSF, y otro sólo estimulaba colonias de granulocitos, G-CSF. El tercero, que instaba la aparición de colonias que contenían distintos tipos celulares, se denominó multi-CSF, o interleucina-3 (IL-3).

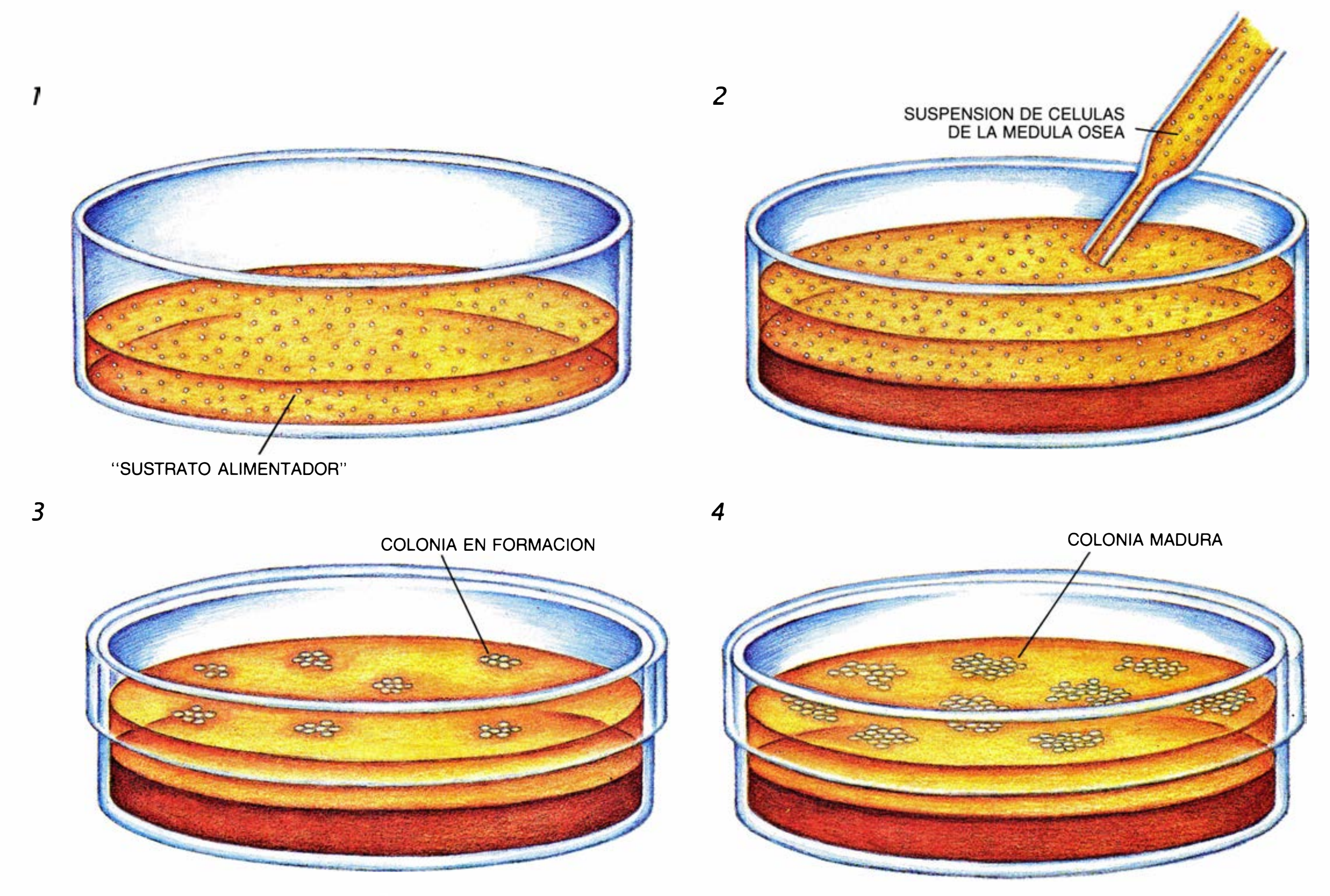
Identificado un conjunto de CSF en función de su actividad en los cultivos, los científicos dedicaron sus esfuerzos a obtener las sustancias puras. Una de las ventajas de disponer de la proteína pu-

rificada era que permitía clonar su correspondiente gen. Una vez clonado, se podría insertar el gen en células de mamífero o células bacterianas, obteniéndose la proteína en cantidades suficientes para la investigación y para llevar a cabo ensayos terapéuticos. El CSF de macrófagos se obtuvo primero en forma purificada (por el grupo de Metcalf), pero su gen no fue el primero que se clonó.

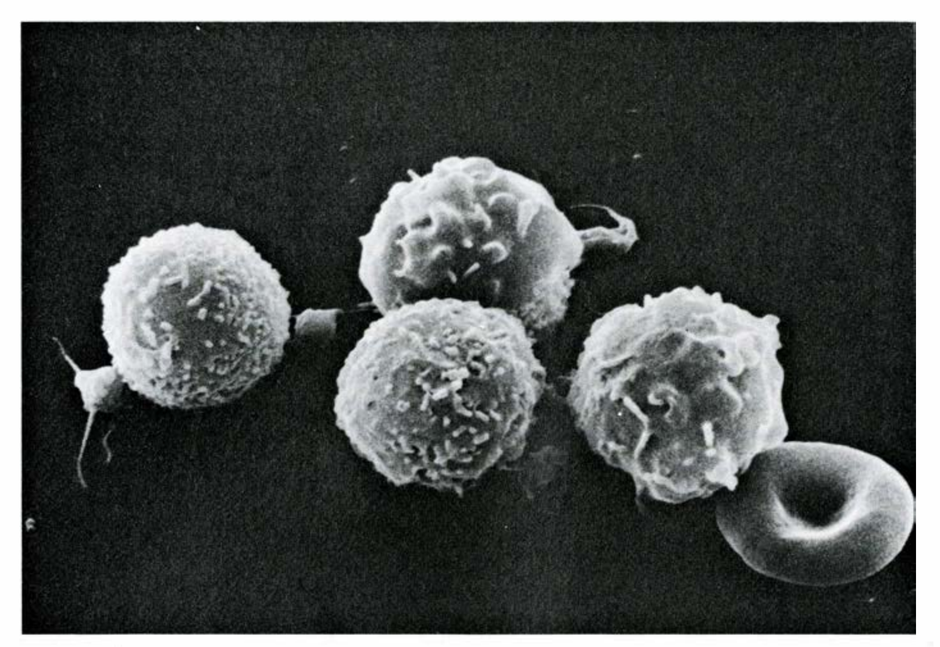
Ese honor correspondió al GM-CSF de ratón. Antony Burgess, del Instituto Walter y Eliza Hall, purificó la proteína a partir de un medio acondicionado con tejido pulmonar de ratones a los que se había inyectado cierta cantidad de endotoxina (una sustancia de las paredes celulares de determinadas bacterias que es capaz de desencadenar una potente respuesta inmunitaria). A continuación, Nicholas M. Gough y Ashley R. Dunn, del Instituto Walter y Eliza Hall, utilizaron una secuencia parcial de aminoácidos de la proteína para confeccionar sondas de ADN complementario (ADNc), con las que pudo identificarse el gen del GM-CSF en una "biblioteca" de secuencias de ADN de ratón. El trabajo con la hormona humana progresaba más despacio, pero, al cabo, nuestro grupo consiguió purificarla a partir de un medio acondicionado por una serie de linfocitos *T* humanos transformados por el virus HTLV-II (un virus humano que puede producir leucemia). Gordon G. Wong y Steven C. Clark, de Genetics Institute, en colaboración con nuestro equipo, desarrollaron en el laboratorio un nuevo sistema para recuperar el gen del GM-CSF de un linaje de células de mono.

GM-CSF fue, por consiguiente, la primera hormona hematopoyética humana cuyo gen pudo someterse a clonación molecular; también fue la primera que se obtuvo con el método del ADN recombinante. No tardarían en pisarle los talones. Yu-Chang Yang, de Genetics Institute, y Clark clonaron algunas secuencias que determinaban la IL-3. Karl Welte y Malcolm A. S. Moore, del Instituto para la Investigación del Cáncer Sloan-Kettering Memorial, con Lawrence M. Souza, de Amgen (y, al mismo tiempo, Shigekazu Nagata, de la Universidad de Tokyo, y sus colaboradores), hicieron lo propio con G-CSF. Durante la realización de esos trabajos, Ernest S. Kawasaki y David F. Mark, de la Corporación Cetus, clonaron parte del ADN para el CSF de los macrófagos. Una vez clonados los genes y obtenidas las hormonas mediante técnicas de recombinación, se podía valorar la capacidad de esas hormonas biosintéticas para estimular el crecimiento de los glóbulos blancos de la sangre. Todas las hormonas recombinantes han demostrado la actividad específica que se esperaba de acuerdo con las observaciones previas en los sistemas de ensayo de colonias.

La clonación de los genes de los CSF humanos suponía un avance importante, pero no ofrecía información directa



5. EXPERIMENTO que propició la identificación de los factores estimuladores de colonias a finales de la década de 1960. Se depositaron sustratos "alimentadores" que contenían distintos tipos de glóbulos blancos en un medio semisólido que se había depositado sobre una pequeña placa de laboratorio (*1*). Se añadieron células de la médula ósea (que contenían células progenitoras) para crear un segundo estrato (*2*). Cuando se incubaba la placa, se formaban colonias de glóbulos blancos en la segunda capa (*3*). Se contabilizaron las colonias y se identificaron las células (*4*). Cuando se modificaba el contenido de la primera capa, se formaban distintos tipos de colonias, señal que denotaba la presencia en el medio de cultivo de una gama de factores estimuladores de las colonias.





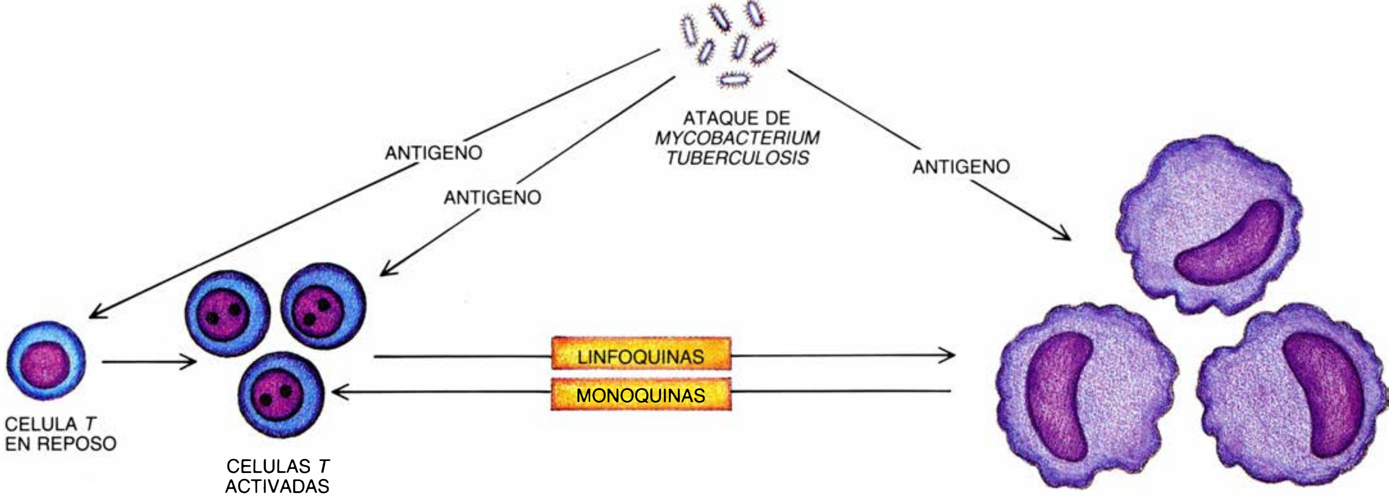
6. GRANULOCITOS ACTIVADOS por el factor estimulador de colonias de granulocitos-macrófagos (GM-CSF). En la micrografía superior los granulocitos se encuentran en fase de reposo (el objeto discoidal de la parte inferior derecha es un eritrocito). En la imagen inferior los granulocitos se han estimulado con GM-CSF. Las proyecciones alargadas, los filópodos, permiten que el granulocito se adhiera a las superficies y establezca contacto con los patógenos. En estas micrografías, obra de Gerald E. Garner y Leonard Hancock, Jr., de Baxter Healthcare Corporation, las células aparecen aumentadas unos 3000 diámetros.

sobre la función de los genes ni sobre las hormonas del organismo humano. A pesar de lo cual, utilizando como sondas los ADN clonados, se ha averiguado en qué cromosomas humanos se encuentran los genes que codifican las hormonas. Aparentemente, sólo existe una copia de cada uno de esos genes. (Ciertos genes se presentan en múltiples copias; tal amplificación permite que la célula fabrique más cantidad del producto determinado por el gen.) Los genes del GM-CSF y de la interleucina 3 se encuentran en puntos muy cercanos del cromosoma 5, lo que sugiere que comparten un antecesor común. Curiosamente, los genes del M-CSF (una proteína sin relación con las dos anteriores) y de su receptor se alojan también en el cromosoma 5. Sin embargo, el gen del G-CSF está en el cromosoma 17.

¿En qué momento del curso de la hematopoyesis se activan o inhiben esos genes? Los trabajos que investigan esa cuestión progresan rápidamente y se está empezando a determinar el mecanismo de regulación del proceso global. Algunos de los genes de los CSF no se expresan en condiciones normales; permanecen quiescentes hasta que la célula recibe una señal específica. Por ejemplo, los linfocitos liberan GM-CSF cuando ciertos antígenos específicos (proteínas foráneas) los activan. Los fibroblastos (células del tejido conjuntivo que participan en la curación de las heridas) y las células endoteliales (que forman las paredes de los vasos sanguíneos) sintetizan también y liberan ese factor cuando se ven expuestos a determinadas sustancias procedentes de los monocitos y de los macrófagos, como el factor de necrosis tumoral y la IL-1. Los macrófagos pueden, asimismo, sintetizar y liberar GM-CSF cuando reciben el estímulo necesario.

Por su parte, ante la presencia de las señales activadoras correspondientes, el gen del GM-CSF se activa también en varios tipos celulares. Las células de la serie monocito-macrófago elaboran ese factor cuando se ven expuestas a endotoxinas; los macrófagos lo fabrican en respuesta a sustancias liberadas por monocitos y macrófagos. El M-CSF se sintetiza en muchas células, macrófagos incluidos, en respuesta a endotoxinas, al GM-CSF o a la IL-3. El gen de la IL-3 entra en operación en los linfocitos activados. Por consiguiente, en respuesta a una red de señales intercelulares, los genes de los CSF despiertan de su estado quiescente y empiezan a elaborar sus productos.

Tal red de interacciones podría parecer compleja. Y lo es. Más aún, todavía no se conoce en su totalidad. Sin embargo, lo que ya se sabe permite trazar un bosquejo de la respuesta del sistema inmunitario frente a un elemento patógeno en términos de factores estimuladores de colonias. En ese esquema, el linfocito *T* y el macrófago desempeñan un papel principal. En respuesta a un antígeno determinado, se activa una serie de células *T* que liberan GM-CSF e IL-3. Al mismo tiempo, los macrófagos, en respuesta a sus estímulos específicos, sintetizan GM-CSF, G-CSF y M-CSF. La liberación de IL-1 y de TNF por parte de los macrófagos dispara la producción de GM-CSF, G-CSF y M-CSF en poblaciones locales de células endoteliales y mesenquimatosas (un tipo celular presente en el músculo, el hueso y el tejido conjuntivo). Como resultado de la liberación de ese conjunto de CSF, proliferan y maduran las subpoblaciones de leucocitos que intervienen en la respuesta inmunitaria.



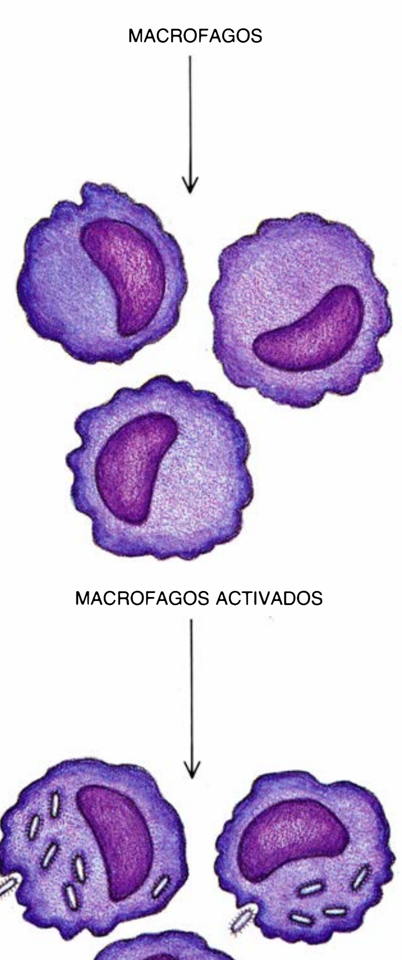
El papel de los CSF en los procesos inmunitarios no termina aquí. Aunque esos factores se identificaron por su capacidad de estimular el crecimiento y la maduración de las células germinales y precursoras, parece que intervienen también en la maduración de los glóbulos blancos. Los neutrófilos, activados por microorganismos invasores, sintetizan y liberan derivados oxigenados altamente tóxicos que pueden matar a los invasores. Richard H. Weisbart, de la Universidad de California en Los Angeles, demostró (en colaboración con nuestro grupo) que el GM-CSF preparaba el neutrófilo aumentando la potencia de su respuesta. El GM-CSF no desencadenaba directamente la reacción oxidativa, pero inducía una liberación de sustancias oxidantes notablemente mayor cuando los neutrófilos se veían expuestos a agentes desencadenantes conocidos, como ciertas proteínas bacterianas.

La misión de los neutrófilos consiste en "buscar y destruir": para que sus armas tengan efecto sobre el invasor, primero deben encontrar el enemigo. Los GM-CSF y G-CSF estimulan el movimiento dirigido de los neutrófilos hacia los agentes desencadenantes. Asimismo, los CSF aumentan la capacidad del neutrófilo para ingerir microorganismos. Aunque no se conocen bien los mecanismos responsables, estudios de Weisbart y sus colaboradores han puesto de manifiesto que el GM-CSF regula el número y la afinidad de los receptores de superficie de la célula neutrófila que reconocen los productos bacterianos. Así, mientras los granulocitos inspeccionan el ambiente en el organismo, los CSF aumentarían su capacidad para detectar los elementos patógenos.

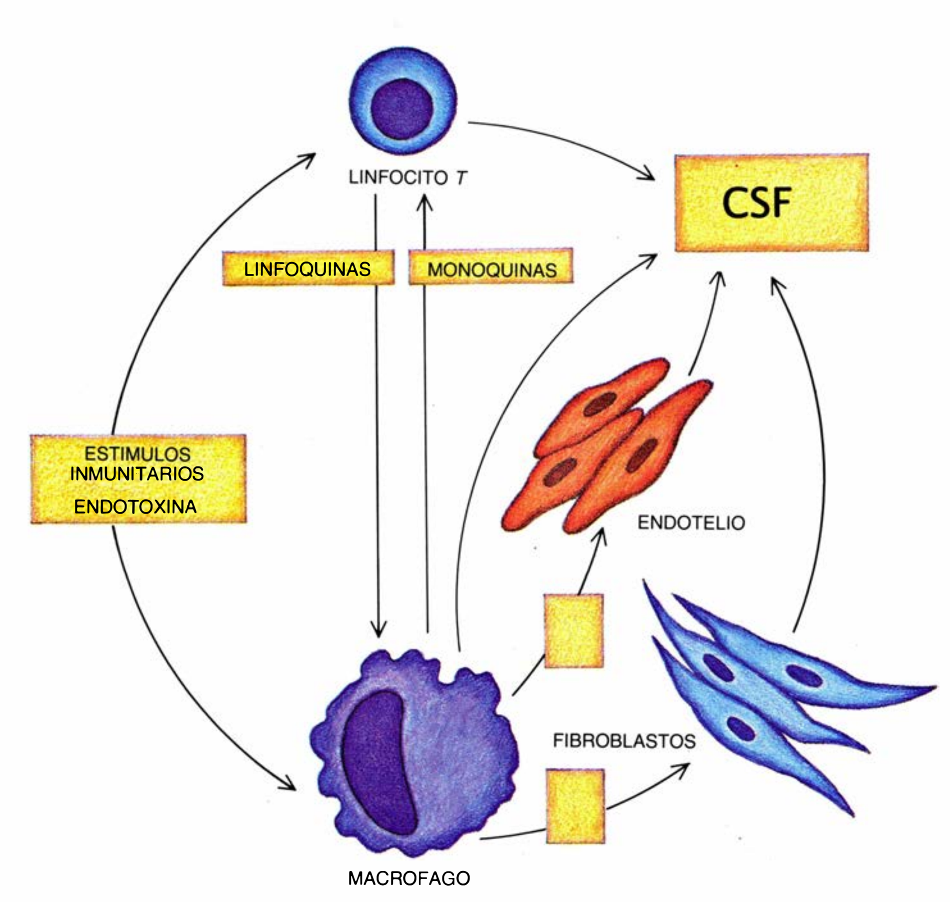
Esa capacidad de "buscar y destruir" del neutrófilo resulta fundamental para la "defensa del hospedador" que organiza el sistema inmunitario. En último término, la defensa del hospedador depende de la destreza de las células efectoras maduras —neutrófilos y macrófagos— para matar a los organismos invasores. Cuando la médula ósea no puede fabricar la cantidad suficiente de neutrófilos o de monocitos, la defensa se resiente. La respuesta de las células efectoras depende también de la colaboración de los linfocitos *T*. Cuando escasean las células *T* o se ha reducido su función (como sucede en el SIDA o en la tuberculosis avanzada), el macrófago se ve incapaz de contener los patógenos intracelulares. Evidentemente, tales deficiencias resultan catastróficas desde el punto de vista clínico; los CSF, que pueden ayudar a corregirlas, ofrecen, por tanto, un alto potencial terapéutico.

Ya se está comprobando parte de ese potencial. Mediante técnicas de recombinación, se ha acometido en animales de laboratorio el estudio de varios CSF. Los ensayos indican que el GM-CSF y el G-CSF resultan relativamente atóxicos y estimulan eficazmente la proliferación de las células de defensa del hospedador. El G-CSF humano aumenta la producción de neutrófilos en ratones y monos. En los monos, tal aumento ha llegado a multiplicar por 50 el nivel normal, apareciendo escasos efectos colaterales. El GM-CSF humano, que no interviene en los ratones, provoca en los monos el aumento de neutrófilos, eosinófilos y monocitos. La administración a monos de IL-3 aislada sólo fomenta un incremento modesto de los glóbulos blancos circulantes pero, administrada en combinación con GM-CSF, estimula vigorosamente la médula ósea y la producción de leucocitos.

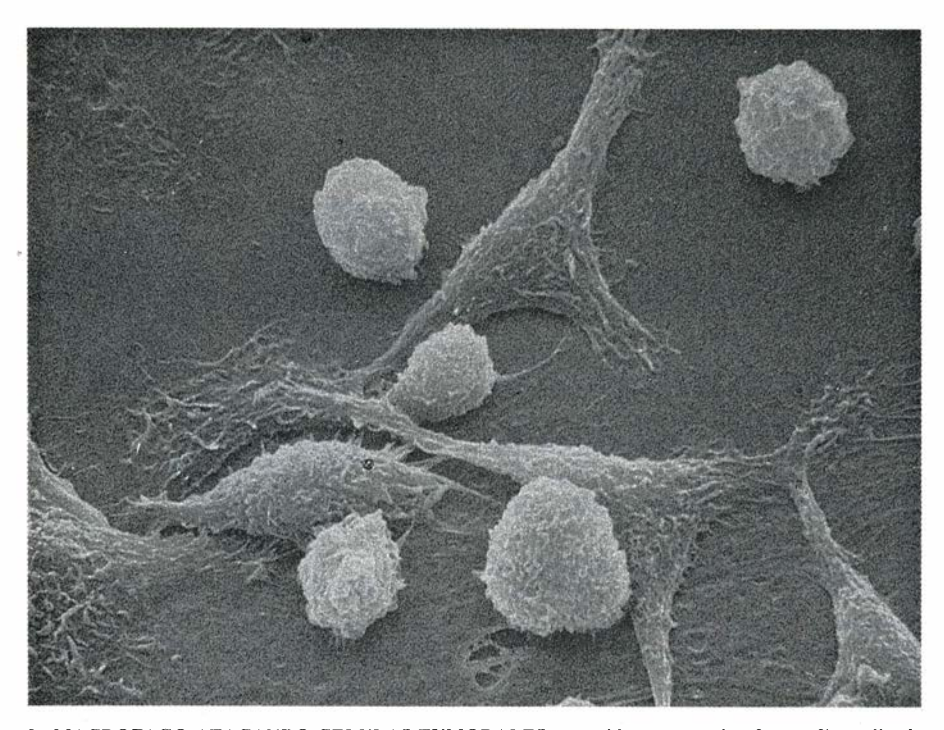
Hasta ahora, en seres humanos sólo



7. MACROFAGOS ACTIVADOS en un proceso en el que se relacionan con los linfocitos *T*. Cuando *Mycobacterium tuberculosis* (el agente de la tuberculosis) se introduce en el organismo, sus proteínas activan una subserie de células *T* que libera linfoquinas; estas sustancias preparan a los macrófagos para ingerir y destruir bacterias. Entre las linfoquinas se cuentan el GM-CSF, la interleucina-3 y el interferón. A su vez, los macrófagos liberan monoquinas, como interleucina-1, que estimulan los linfocitos.



8. FACTORES ESTIMULANTES DE COLONIAS (CSF) liberados por diversas células en respuesta a la presencia de patógenos. El estímulo inmunitario (los antígenos) induce a las células *T* a liberar CSF. Las endotoxinas (moléculas de la pared celular de ciertas bacterias) ejercen ese mismo efecto sobre los macrófagos. Además, el macrófago sintetiza sustancias que instan la liberación de CSF por otros tipos de células: las células endoteliales (que forman la pared de los vasos sanguíneos) y los fibroblastos (células del tejido conjuntivo que intervienen en la sanación de las heridas). (Los dibujos son de Patricia J. Wynne.)



9. MACROFAGO ATACANDO CELULAS TUMORALES, recogido en una microfotografía realizada asimismo por Shirley G. Quan. Los macrófagos (de morfología plana e irregular), lo mismo que las células tumorales (redondeadas), proceden de un ratón. En vez de ingerir las células tumorales (como hacen con las bacterias), los macrófagos destruyen el tumor mediante la liberación de toxinas (citemos el factor de necrosis tumoral) y por contacto superficial (a través de algún mecanismo que no se conoce del todo).

se han realizado unos pocos ensayos con CSF recombinantes, que tienden a confirmar las perspectivas prometedoras fundadas en los trabajos con animales. Ronald Mitsuyasu, trabajando con nosotros y con Jerome Groopman, del Hospital Diocesano de Nueva Inglaterra, dirigió el primer ensayo humano en fase I y fase II (seguridad y eficacia) del GM-CSF en enfermos de SIDA que presentaban la característica disminución del recuento de glóbulos blancos. Este primer estudio demostró que el GM-CSF se toleraba bien y aumentaba los niveles de neutrófilos, monocitos y eosinófilos circulantes en la sangre. Por otra parte, se está estudiando también el GM-CSF como recurso terapéutico para el cáncer, los estados preleucémicos y la anemia aplásica (una anemia debida a un mal funcionamiento de la médula ósea).

Los estudios de los restantes CSF no se encuentran tan avanzados como los del GM-CSF, pero van cobrando ímpetu. Janice Gabrilove y sus colaboradores, del Sloan-Kettering, administraron G-CSF a enfermos de cáncer de vejiga que se estaban tratando con quimioterapia combinada, que suele causar una supresión de la función de la médula ósea y disminuye el recuento de glóbulos blancos en la sangre. La hormona presentó pocos efectos colaterales y estimuló claramente la producción de neutrófilos en la médula ósea, reduciéndose la supresión. El M-CSF parece ser también relativamente atóxico en monos y seres humanos, pero no se ha sometido aún a ensayos clínicos rigurosos. La IL-3 se encuentra en el mismo caso.

Los resultados clínicos obtenidos hasta el momento permiten albergar la esperanza de que algún día los CSF demostrarán su valor en el tratamiento de enfermos de SIDA y en el de la leucopenia (recuento bajo de glóbulos blancos) asociada a la quimioterapia del cáncer. De aceptarse la capacidad de esos factores para aumentar el número y la actividad de las células defensivas del hospedador, resulta evidente que los CSF encontrarán también aplicación en otros campos. Por ejemplo, el trasplante de médula ósea es una técnica complicada, que obliga a prestar atención hospitalaria durante semanas al sujeto receptor y durante un período algo menor al donante. La administración de CSF favorecería la recuperación del receptor en una sola semana. El tratamiento de los donantes con CSF permitiría extraer cantidades muy in-

feriores de médula y la donación podría llevarse a cabo sin necesidad de hospitalización.

En la mayoría de las aplicaciones comentadas, el objetivo consistía en reforzar el sistema inmunitario debilitado, como ocurre en el SIDA, quimioterapia del cáncer o anemia aplásica. Sin embargo, los CSF podrían utilizarse también como estimulantes del sistema inmunitario normal. En el futuro, multitud de infecciones podrían tratarse aumentando el número y la potencia de las células de defensa del hospedador. Parte de la terapia de las enfermedades parasitarias contemplaría la administración de CSF para regular el número de eosinófilos. Hay ciertos tratamientos experimentales del cáncer que consisten en marcar las células tumorales con anticuerpos, para que las destruyan los monocitos y los neutrófilos; los CSF, por incrementar el número y la actividad de tales células efectoras, resultarían de gran ayuda en esas estrategias.

El valor de los CSF en el campo de la medicina estriba en su poder para mejorar la capacidad defensiva del enfermo. En el pasado, los únicos medios de que disponía la medicina para aumentar esos mecanismos eran indirectos (por ejemplo, mejorar la alimentación) o específicos para determinadas enfermedades (como la inmunización). Se han desarrollado múltiples estrategias para atacar los organismos invasores, de las que los antibióticos constituyen el ejemplo más notable. Sin duda, en el futuro la investigación encontrará formas nuevas y más potentes de intervenir en el metabolismo del invasor. Ahora bien, gracias a los CSF, los clínicos disponen ya de un nuevo recurso para reforzar las defensas del enfermo contra los microorganismos e incluso contra el cáncer.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HEMATOPOIETIC STEM CELLS. Dirigido por David W. Golde y Takaku Fuminaro. Marcel Dekker, Inc., 1985.

THE GRANULOCYTE-MACROPHAGE COLONY-STIMULATING FACTORS. Donald Metcalf en *Science*, vol. 229 n.º 4708, págs. 16-22; 5 de julio de 1985.

THE HUMAN HEMATOPOIETIC COLONY-STIMULATING FACTORS. Steven C. Clark y Robert Kamen en *Science*, vol. 236, n.º 4805, págs. 1229-1237; 5 de junio de 1987.

MYELOID GROWTH FACTORS. D. W. Golde y J. C. Gasson en *Inflammation: Basic Principles and Clinical Correlates*, dirigido por J. I. Gallin, I. M. Goldstein y R. Synderman. Raven Press, 1988.

Ciencia y sociedad

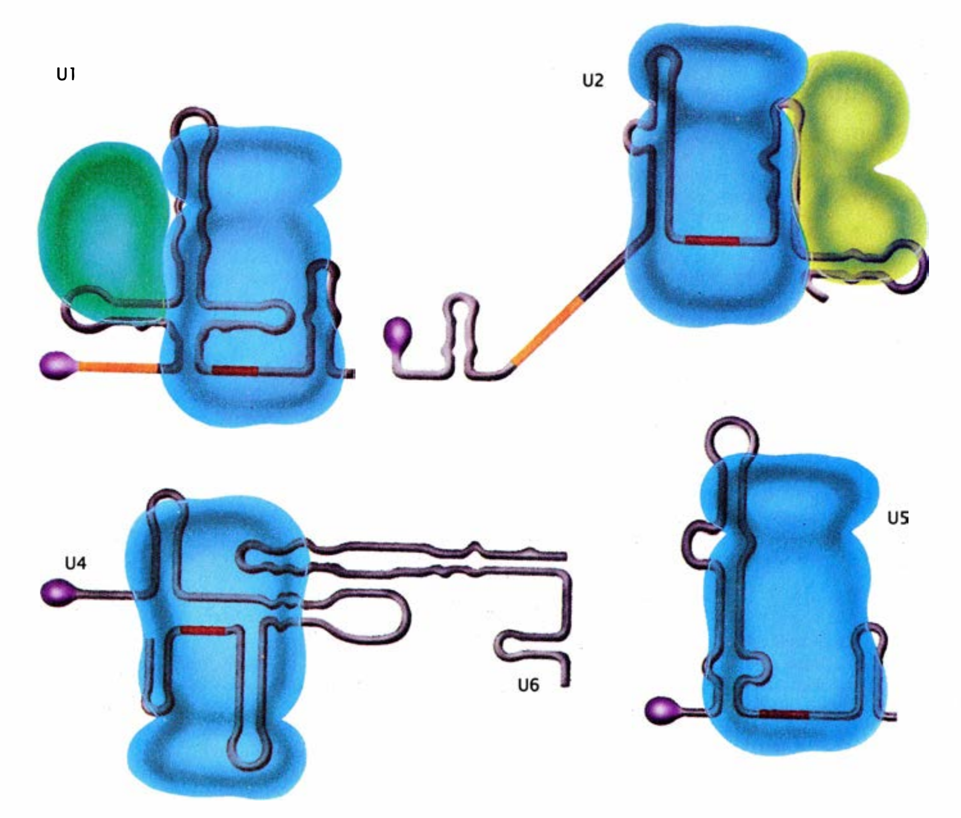
Snurps

En 1977, Joan Argetsinger Seitz y Michael R. Lerner tropezaron con una clase enteramente nueva de componentes nucleares, importantes mediadores de la expresión génica, según se comprobaría. Se trataba de pequeños complejos de ARN y proteínas. Los denominaron ribonucleoproteínas nucleares pequeñas (o RNPnp), y ha acabado llamándoseles "*snurps*" (por sus siglas en inglés: snRNP).

Existen muchos tipos de *snurps*, pero sólo se conocen las funciones de unos pocos, que han resultado desempeñar un papel decisivo en la actividad celular. Constituyen los principales componentes de una refinada agrupación molecular que se ha especializado en la maduración del ARN mensajero (ARNm), intermediario esencial a través del cual las instrucciones contenidas en el mensaje genético llegan al resto de la célula.

En las células de los organismos superiores, la expresión génica se inicia en el núcleo, donde la hebra codificadora del ADN, que es una molécula bicatenaria, se transcribe en ARNm, monocatenario. Posteriormente, el ARNm abandona el núcleo y sale al citoplasma, donde su secuencia de nucleótidos se traduce en una secuencia de aminoácidos que, una vez plegada, forma una proteína.

En el proceso de expresión génica participan, además del ARNm, otros dos tipos de ARN. Igual que el mensajero, se transcriben a partir de ADN, pero no acarrean la información para la síntesis de proteínas, sino que colaboran en la traducción del ARNm. El de transferencia (ARNt) aporta aminoácidos al ARNm y, el ribosómico (ARNr), constituye un componente principal de los ribosomas, los complejos de ARN y proteína que, durante la síntesis proteica, median en la interacción entre ARNm, ARNt y los aminoácidos.



1. CUATRO TIPOS DE RNPnp (o "snurps"*) y cinco especies de ARN nuclear pequeño participan en la maduración del ARNm. Los ARNnp* (gris) *se han denominado U1, U2, U4, U5 y U6. U4 y U6 se alojan en la misma partícula de RNPnp. U6 es el único ARNnp que carece de la característica caperuza* (púrpura)*. Todos los* snurps *contienen un mismo complejo de proteínas* (azul)*; a los ARNnp U1 y U2 se asocian, además, otras proteínas* (verde)*. Se indican en naranja los sitios de unión de las proteínas comunes y, en amarillo, los del ARNm*

En los organismos superiores, la expresión génica se complica por la presencia, en el ADN, de regiones sin misión codificadora: intrones. Miden entre 65 y 100.000 nucleótidos de longitud y en un solo gen llega a haber hasta una cincuentena. Las secuencias de ADN se transcriben por entero, sin distinguirse intrones de "exones" (las regiones codificadoras); por consiguiente, el transcrito inicial está salpicado de segmentos que carecen de significado genético. Si la síntesis de proteínas se realizara sobre ese "pre-ARNm", fracasaría en el momento mismo de tropezarse con un intrón. Por consiguiente, antes de que los transcritos de ARNm salgan al citoplasma, deben eliminarse los intrones y empalmarse los exones, en el mismo orden que presentaban en el ADN.

Los *snurps* median ese decisivo proceso de depuración. Su participación en la maduración del ARNm se determinó hace ya varios años y poco a poco va dilucidándose el mecanismo de su acción. A principios de la década de 1970 se ignoraba la existencia de intrones y el comportamiento del ARNm de las células de los organismos superiores constituía un misterio. En experimentos realizados en muchos laboratorios se había comprobado con sorpresa que sólo una pequeña fracción del ARN transcrito en el núcleo llegaba en última instancia al citoplasma. La mayor parte se degradaba a los pocos minutos de haberse sintetizado.

En 1968, O. P. Samarina, G. P. Georgiev y sus colaboradores, de la Academia de Ciencias de la Unión Soviética, descubrieron la existencia de hebras insólitamente largas de ARN tachonadas de proteínas, a modo de cuentas de un collar. Se sabía que esas canicas proteicas, que se denominaron ribonucleoproteínas nucleares heterogéneas (RNPnh), se formaban poco después de que el ARNm precursor se hubiera transcrito a partir del ADN progenitor.

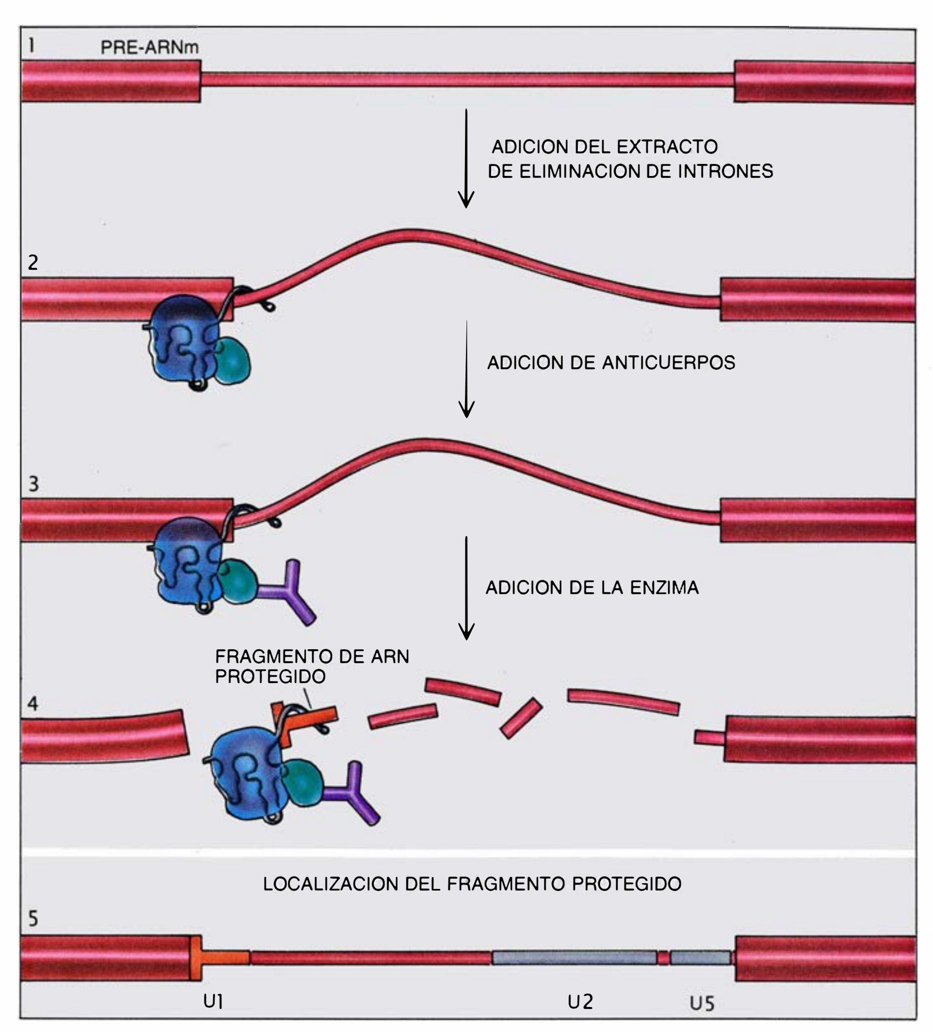
Convencida de que la unión de las cuentas de proteína al filamento de ARN debía resultar decisiva para determinar qué porciones del pre-ARN se degradarían y cuáles se exportarían al citoplasma, Argetsinger intentó en vano obtener anticuerpos contra esos RNPnh. El descubrimiento de anticuerpos que reaccionaran contra esas proteínas y bloquearan su función, ayudaría, pensaba, a entender esta última.

Por lo común, los biólogos "crean" anticuerpos contra un antígeno determinado inyectándolo en animales. El sistema inmunitario del receptor reacciona y elabora anticuerpos contra el invasor, que pueden recuperarse del suero del animal. Durante siete meses inoculó RNPnh de hígado de rata en conejos y pollos y, dada la falta de resultados, concluyó que, en los vertebrados, las RNPnh debían ser muy similares.

Coincidiendo con esos ensayos se realizó el trascendental descubrimiento de la existencia de intrones y del procesamiento del ARN en las células de mamífero, fenómenos que venían a explicar la notable longitud de los precursores del ARNm y por qué el pre-ARN sufría un acortamiento tan notable. Se comprobó también que en muchos genes la proporción de intrones superaba a la de exones y que la "caperuza" y la "cola" (grupos químicos característicos situados en los extremos de la molécula de ARN) no se modificaban en el transcurso del proceso de maduración.

A finales de 1977, poco después de pasar un año sabático en el laboratorio de Klaus Weber, del Instituto Max Planck de Química Biofísica de Göttingen, durante el cual decidió dedicarse a la investigación del ARN de las células de mamífero, llamó la atención de Argetsinger y de Lerner, a la sazón doctorando de su grupo, un artículo de *Nature* que comentaba el hallazgo de anticuerpos anómalos en pacientes de enfermedad mixta del tejido conjuntivo. Emparentada con el reumatismo y el lupus eritematoso sistémico, se cataloga entre las enfermedades autoinmunitarias, en las que el sistema inmunitario sufre una alteración y elabora anticuerpos contra las células del propio paciente. En la enfermedad mixta del tejido conjuntivo destacaba la abundancia de cierto anticuerpo, al que los autores del artículo denominaban anti-RNP. Ignoraban la naturaleza exacta del antígeno al que se unía el anti-RNP, pero habían logrado determinar que constaba de ARN y proteína y que se encontraba en los núcleos celulares de muchas especies de mamífero.

Quizá, pensó Argetsinger, ese anticuerpo fuese precisamente el que había intentado obtener contra las RNPnh. Los ensayos realizados para comprobarlo la quitarían del error: el anticuerpo se unía a pequeños componentes nucleares muy abundantes y extendidos entre las células de mamífero. También lo hacía otro anticuerpo, el



2. EXPERIMENTO DE PROTECCION mediante el cual se han definido los segmentos a los que se enlazan las RNPnp. Se parte de la mezcla de pre-ARN con un extracto de corte y empalme (1), combinado de elementos requeridos para que se realice in vitro *la excisión de los intrones. Las RNPnp del extracto se unen al pre-ARN (2). Seguidamente, se vierten anticuerpos que se unen a una RNPnp determinada (3). La mayor parte del ARN se destruye ante la acción de una enzima que degrada el ARNm que no se ha asociado (4), permaneciendo intacto el ARNm que se ha unido a la RNPnp, que se recupera provocando la precipitación del anticuerpo. Aplicando este procedimiento se identificaron los sitios de unión anterior (U1), posterior (U2) y el U5 (5)*

anti-Sm, emparentado con aquél. Tras un año de innumerables experimentos, y valiéndose de técnicas de inmunoprecipitación aplicadas a cultivos de células humanas cuyo ARN portaba un marcaje radiactivo, se aislaron las partículas que actuaban de antígeno: las RNPnp.

Se descubrieron cinco especies de ARN asociado a las RNPnp: U1, U2, U4, U5 y U6 (la *U* alude a que el uracilo es el constituyente principal de ese ARN nuclear pequeño, o ARNnp). Esa constituía la primera caracterización de U4, U5 y U6, pero U1 y U2 se conocían ya: a principios de la década de 1970 se había determinado su secuencia en el laboratorio de Harris Busch, de la Facultad de Medicina Baylor. En efecto, antes incluso de precipitar U1, el grupo de Argetsinger analizó la hipotética secuencia y advirtió que el ARN adyacente a la caperuza podría aparearse con el ARN próximo a los puntos de excisión de los intrones, que presentaban "secuencias consenso": breves segmentos de nucleótidos cuya secuencia coincidía en muchos intrones.

También advirtieron esa llamativa complementaridad de secuencias John Rogers y Randolph Wall, de la Universidad de California en Los Angeles, quienes propusieron que U1 podría constituir el agente que alineara los dos extremos del intrón durante el proceso de empalme. La hipótesis pecaba de simplista, pero andaba bien encaminada.

No podrían obtenerse pruebas direc-

tas de la participación de la RNPnp de U1 en la eliminación de los intrones hasta el desarrollo de extractos celulares donde pudiera realizarse ese proceso *in vitro*. En pocos años se puso a punto el procedimiento: intervinieron, sobre todo, los laboratorios de Walter Keller, en el Centro de Investigación del Cáncer de Heidelberg, Sharp, en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, Tom Maniatas, de la Universidad de Harvard, y John N. Abelson, del Instituto de Tecnología de California. Por su parte, Argetsinger había encontrado que las RNPnp de U1 y U2 contenían un mínimo de siete proteínas distintas cada una, algunas comunes a ambas y otras exclusivas de cada tipo de partícula. Posteriormente, Carl Hashimoto, alumno del laboratorio de Argetsinger, y el grupo de Reinhard Lührmann, del Instituto Max Planck de Genética Molecular de Berlín, hallaron que U4 y U6 solían residir en la misma RNPnp. Las demás RNPnp contenían un solo tipo de ARN. Las cinco especies de ARNnp se presentaban, pues, en cuatro tipos de RNPnp nada más.

Purificadas las RNPnp, el siguiente paso consistía en averiguar si se enlazaban al pre-ARN y, en caso afirmativo, por dónde. Se recurrió al ensayo de "protección", procedimiento sin especial complejidad teórica: se mezclaba una solución de ARNm con otra de RNPnp, se añadían anticuerpos para marcar las ribonucleoproteínas y, luego, una enzima que degradaba el ARNm que no se hubiera unido. La región del ARNm enlazada a las RNPnp quedaba protegida de la degradación y podía aislarse y secuenciarse. Para situar en el conjunto del pre-ARNm el fragmento protegido, se comparaba la secuencia de nucleótidos de ambos.

Stephen M. Mount, también alumno de Argetsinger, determinó, aplicando el ensayo de "protección", que las RNPnp de U1 participaban en la excisión de los intrones y se unían a un segmento de unos 17 nucleótidos del extremo anterior del intrón; se comprobó asimismo que la región del ARNnp U1 próxima a la caperuza resultaba esencial en el proceso.

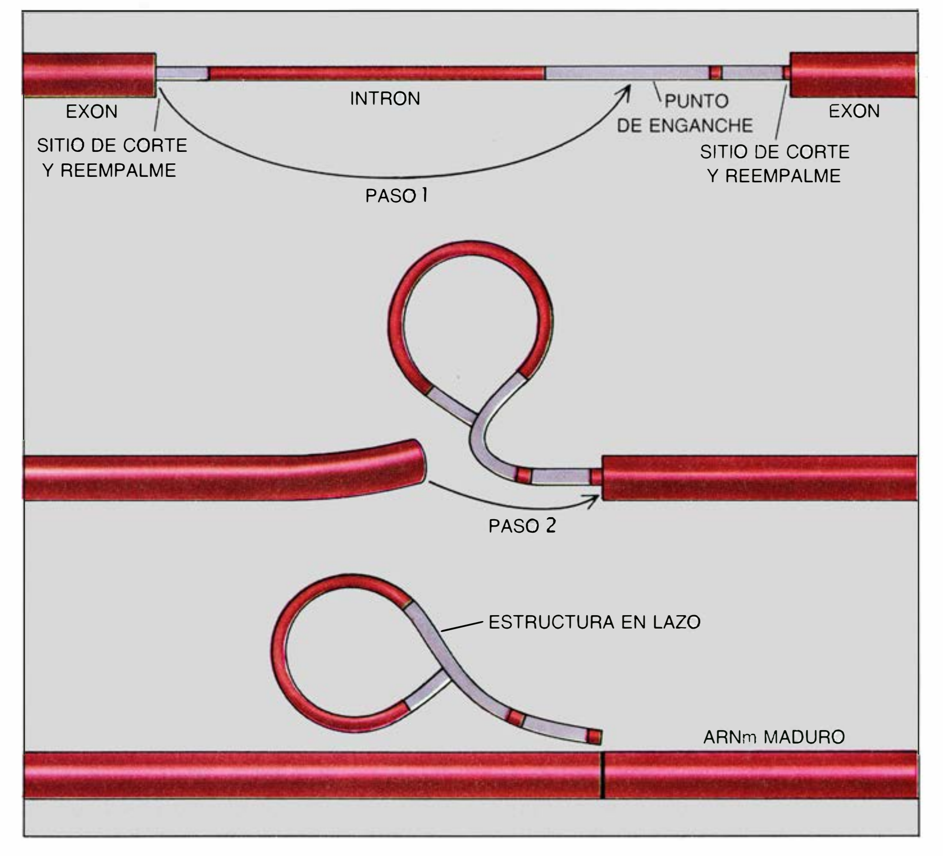
Una tras otra, se fueron aclarando las funciones de las restantes RNPnp. En 1984, al dilucidarse las estructuras intermedias del ARNm durante su maduración, se apuntó la existencia de otro punto de unión de las partículas ribonucleoproteicas. Los estudios revelaron que el empalme de exones se realizaba en dos pasos: en el primero, se cortaba el sitio anterior de excisión y reempalme y se enganchaba a un nucleótido cercano al sitio posterior, formando el intrón una estructura en lazo. Seguidamente se empalmaban los dos exones y se liberaba el lazo del intrón, que acababa degradándose.

Como se sospechó, ese punto de enganche constituía la región de enlace de una partícula nucleoproteica. Benoit Chabot, alumno de Argetsinger, descubrió, mediante ensayos de "protección", que la partícula U2 se unía a una fragmento de 40 nucleótidos del intrón que contenía el punto de enganche. Simultáneamente, Douglas L. Black, del laboratorio también de Argetsinger, y Adrian R. Krainer y Maniatis, en Harvard, demostraron que, *in vitro*, la RNPnp de U2 resultaba imprescindible para que tuviera lugar la eliminación del intrón.

Chabot realizó también ensayos que revelaron la unión de la RNPnp de U5 a una región de unos 15 nucleótidos del extremo posterior del intrón. Más recientemente, Black, junto con Susan M. Berget y Barbara L. Robberson, de la Facultad de Medicina Baylor, comprobaron que la destrucción de U4 y U6 debilitaba la maduración, por lo que la partícula U4-U6 debía resultar también necesaria en el proceso de empalme de exones. Se ignora hasta la fecha si interactúa con el filamento del pre-ARN o con otra RNPnp.

Las longitudes atribuidas a las regiones de enlace encajaban bien con el límite inferior de los intrones naturales conocidos: unos 65 nucleótidos, cifra que equivalía aproximadamente a la suma de los tamaños de los fragmentos de intrón a los que se unían U1, U2 y U5 en los experimentos de protección. Parecía, por consiguiente, que la geometría del enlace de las ribonucleoproteínas nucleares pequeñas dictaba una longitud mínima de los intrones.

Experimentos genéticos recientes, en los que se manipulaba la secuencia nucleotídica del ARNnp y del pre-ARN han confirmado las supuestas interacciones entre los dos ARN en los sitios de unión de U1 y U2. Se conoce peor la interacción entre ARN y proteína que tiene lugar en el reconocimiento del sitio de excisión posterior, y queda por determinar qué fracción de los contactos de RNPnp constituyen in-



3. ESTRUCTURA EN LAZO que se forma en el curso de la eliminación del intrón. El proceso de corte y reempalme se realiza en dos pasos, mediados por RNPnp (que no se muestran). *En el primero de ellos, se corta el sitio de excisión anterior y se engancha al sitio de unión de U2; se forma entonces el lazo. En el segundo paso, se reúnen los exones y se libera el intrón*

teracciones entre ARN y cuál se realizan mediante proteínas.

Según se ha comprobado, las RNPnp y sus sustratos de pre-ARNm ni siquiera constituyen un tercio de la masa de los complejos que llevan a cabo el proceso de eliminación de los intrones, esa suerte de "somites cirujanos" que empieza a conocerse por su denominación inglesa de *spliceosomes*. El resto debe corresponder a factores proteicos implicados en el ensamblaje y desensamblaje del propio complejo; ciertos datos sugieren que parte de esas proteínas coinciden con las de las canicas de RNPnh que instaron los primeros trabajos de Argetsinger sobre las RNPnp.

Poco se sabe aún hoy sobre esas cuentas; algo mejor se conocen los complejos de eliminación de intrones. Su gran tamaño da respuesta a una de las preguntas que plantea la maduración del pre-ARNm: ¿cómo "sabe" la célula que un ARNm se encuentra preparado para su envío al citoplasma? Los complejos poseen magnitud suficiente para que el transcrito de ARNm no pueda atravesar los poros nucleares, y no se desarman hasta que ha terminado la eliminación de intrones. Se impide así que el filamento abandone el núcleo prematuramente.

Uno de los aspectos más sorprendentes de la función de los somites cirujanos es que la actividad catalítica que realizan parece depender del conjunto de la estructura y no sólo de alguno de sus componentes. La lesión de una cualquiera de las cuatro RNPnp mutila el proceso y ninguna se basta por sí sola para realizarlo. Acaso las RNPnp cooperen con otros componentes de la estructura e impriman al intrón una configuración que desencadene un proceso de "autoeliminación" de exones. En algunos organismos, los precursores de ARNm forman bucles y se deshacen de los intrones sin ayuda de factores proteicos ni de ARN; quizá los corpúsculos de maduración se limiten a aportar secuencias intrónicas perdidas que resultan necesarias para llevar a término el alineamiento que exige el inicio de esa depuración "espontánea".

Quedan por responder todavía muchas cuestiones sobre esas estructuras. La maduración está sometida a control: en un mismo pre-ARN, el proceso de eliminación de intrones difiere con los estadios del desarrollo y los tejidos. Nadie sabe hasta la fecha si en esa regulación intervienen RNPnp u otros factores de los somites cirujanos. Igualmente inciertos son el mecanismo de ensamblaje de la estructura y el número total de componentes implicados. No se ha identificado el agente que sujeta el intrón anterior hasta que se empalma con el posterior; ni se conoce el mecanismo que asegura la fidelidad del proceso global. ¿Contempla la actividad de las estructuras de maduración la corrección de posibles errores?

Los *snurps* no son las únicas ribonucleoproteínas pequeñas que se conoce. Se han identificado complejos similares de proteína y ARN en el citoplasma y en el nucleolo; pese a haberse determinado la estructura de varios de ellos, sólo se conoce la función de uno. Dada la relativa variedad de las RNPnp y de otras ribonucleoproteínas pequeñas, no resulta aventurado esperar que las futuras investigaciones atribuyan a esas partículas una diversidad mayor aún de funciones.

La complejidad, cuantificada

La mayoría de la gente admitirá que las rosas son más complejas que los gases; pero, ¿cuánto más? ¿Qué son más complejas, las rosas o las moscas del vinagre? En las últimas décadas se han propuesto varios procedimientos para medir la complejidad de los números, pero ninguna medida de la complejidad de los objetos físicos ha ganado la aceptación general.

Seth Lloyd y Heinz Pagels, de la Universidad Rockefeller, han esbozado un enfoque prometedor: la profundidad termodinámica, una medida que enlaza complejidad y termodinámica. Según explica Lloyd, el parámetro se formuló de tal modo que resulta nulo en los estados totalmente ordenados, como la disposición regular de los átomos del diamante, y en los estados totalmente aleatorios, como las moléculas de los gases. Su valor es elevado en los estados intermedios. Otra premisa: adquirir complejidad no debe resultar un proceso sencillo; verbigracia: dos bacterias no duplican la complejidad de una sola, pues las bacterias generan fácilmente copias de sí mismas.

Esos requisitos y unas pocas estipulaciones más llevaron a Lloyd y Pagels a una noción basada en el proceso de creación de los objetos. Por ejemplo, la profundidad termodinámica de fabricar un coche a partir de un esbozo equivale a la suma de la profundidad termodinámica de fabricar todos los componentes a partir del esbozo más la profundidad termodinámica de reunirlos. Técnicamente, la profundidad termodinámica actual de un sistema es la diferencia entre dos cantidades. La primera: la entropía (una medida de la falta de exactitud del conocimiento que tiene el observador sobre un sistema). El valor de la segunda cantidad depende de la cantidad de información necesaria para especificar todas las trayectorias por las que el sistema puede haber alcanzado su estado actual a partir de un estado medido en un tiempo anterior. Son muchas las trayectorias posibles, pues el sistema podía encontrarse en muchos estados, diversos pero difícilmente distinguibles.

Desde una interpretación más intuitiva, la profundidad termodinámica de un proceso es una medida de la dificultad que entraña reunir algo: la diferencia entre la cantidad de información necesaria para describir el sistema ahora y la cantidad precisa para describir todos los estados en que podía hallarse al comienzo del proceso. Consecuentemente, la profundidad termodinámica resulta proporcional a la cantidad de información que ha descartado el proceso.

La medida presenta varias propiedades satisfactorias. La profundidad termodinámica de una bacteria es muy elevada, porque, a lo largo de los eones, la evolución ha descartado gran cantidad de información genética hasta llegar a los ejemplares actuales. La profundidad termodinámica añadida cuando obtiene una copia de sí misma es relativamente pequeña. La medida supera también anteriores definiciones de la complejidad. Lloyd afirma que la respuesta de los físicos que han leído la primera exposición del trabajo que ha desarrollado junto con Pagels ha sido "cautelosamente entusiástica", si bien algunos sostienen que debe darse más rigor a los argumentos y que la medida presenta algunas propiedades poco deseables.

¿Para qué sirve medir la complejidad? Según Lloyd, si se demuestra que la profundidad termodinámica resulta de aplicación general, podría constituir una herramienta de estudio de los sistemas complejos: la evolución y procesos biológicos como el autoensamblaje de las proteínas, donde la tendencia universal de la materia hacia el desorden sufre una inversión local. Opina también que el parámetro podría resolver conceptos que hoy constituyen meras conjeturas, como es el caso de la hipótesis según la cual los sistemas complejos son, por necesidad, termodinámicamente inestables. Lloyd está aplicando la medida a explorar la idea de que la evolución de los sistemas complejos resulta inevitable.

El ciclo del supercontinente

En la historia de la Tierra, los continentes se han reunido varias veces en un solo cuerpo que luego se ha roto. El proceso, que parece ser cíclico, podría condicionar la geología y el clima y, con ello, influir en la evolución biológica

R. Damian Nance, Thomas R. Worsley y Judith B. Moody

¿Es la tectónica de placas un proceso estocástico o discurre de modo ordenado? Según la teoría de ese mismo nombre, la capa exterior, rígida, de la Tierra, la litosfera, es un mosaico de lajas que se mueven unas respecto de las otras a velocidades cuyo promedio se cifra en unos pocos centímetros anuales. Las placas flotan sobre una capa caliente y plástica del manto terrestre, la astenosfera. La mayoría de los movimientos de las placas los impulsa la expansión del fondo del mar, en virtud de la cual, asciende, a través de la litosfera, material fundido de la astenosfera, que mana en altas prominencias, o dorsales, del fondo del océano; allí se enfría y se convierte en la corteza que constituye el fondo oceánico. Conforme va creándose, la corteza oceánica se va alejando de las dorsales mesoceánicas, en dirección a los continentes. Si el fondo oceánico y el continente adyacente se encuentran en la misma placa litosférica, el continente se ve arrastrado por la cinta transportadora de corteza oceánica. En caso contrario, la corteza oceánica se hundirá bajo el continente y retornará al manto en un proceso de subducción.

Solemos describir los continentes como objetos pasivos que avanzan transportados por la propia expansión del fondo del mar. Pero no quedan indemnes: los procesos de tectónica de placas dejan huella en ellos. Chocan y se asocian bloques de corteza continental, formando nuevos continentes de mayor extensión; algunos continentes se cuartean en profundas fracturas que, en última instancia, constituyen los centros de nuevas cuencas oceánicas. La historia de la tierra aporta pruebas de que los continentes han experimentado varias veces esos procesos a gran escala y de que la mayoría de aquéllos, si no todos, se han congregado en un supercontinente, que se subdividió luego en muchos menores, para volverse a juntar en un nuevo supercontinente.

Función del calor

¿Qué proceso rige la formación y destrucción de supercontinentes? ¿Aparecen y desaparecen de modo estocástico, por el movimiento al azar de las placas continentales? Diversas regularidades del registro geológico nos ha inducido a pensar que quizás intervenga un proceso mucho más ordenado, incluso cíclico. Inspirándonos en las ideas de Don L. Anderson, del Instituto de Tecnología de California, y en las clarividentes observaciones del geólogo holandés J. Umgrove (expuestas en su libro de 1947 *El pulso de la Tierra*) hemos diseñado un marco teórico que describe los mecanismos verosímiles que explicarían ese "ciclo del supercontinente".

En nuestra teoría, la fuerza dominante procede del calor. El avance de las placas tectónicas suele atribuirse a movimientos convectivos del manto subyacente, impulsados por el calor que procede de la desintegración de elementos radiactivos. La desintegración radiactiva (y la consecuente producción de calor) constituye un proceso continuo cuyo ritmo ha disminuido uniformemente con el tiempo, por cuya razón, la mera producción de calor no basta para justificar el carácter episódico inherente a la alternancia de ensamblaje y rotura continental.

Somos de la opinión de que el fenómeno clave no es la producción de calor, sino su conducción y pérdida a través de la corteza terrestre. La capacidad conductora de la corteza continental equivale a sólo la mitad de la capacidad de la corteza oceánica. Por consiguiente, como señaló Anderson, si un supercontinente estacionario cubre parte de la superficie terrestre, bajo él se acumulará calor del manto; ello provocará su abovedamiento hasta acabar rompiéndolo. Al dispersarse los fragmentos del supercontinente, el calor podrá transferirse a través de las nuevas cuencas oceánicas creadas entre ellos. Liberada cierta cantidad de calor, los fragmentos volverán a reunirse.

En otras palabras, creemos que la superficie terrestre viene a ser como una cafetera de filtro, en la que la entrada de calor es esencialmente continua. Sin embargo, debido a la pobre conducción continental, el calor se libera en impulsos más o menos repentinos.

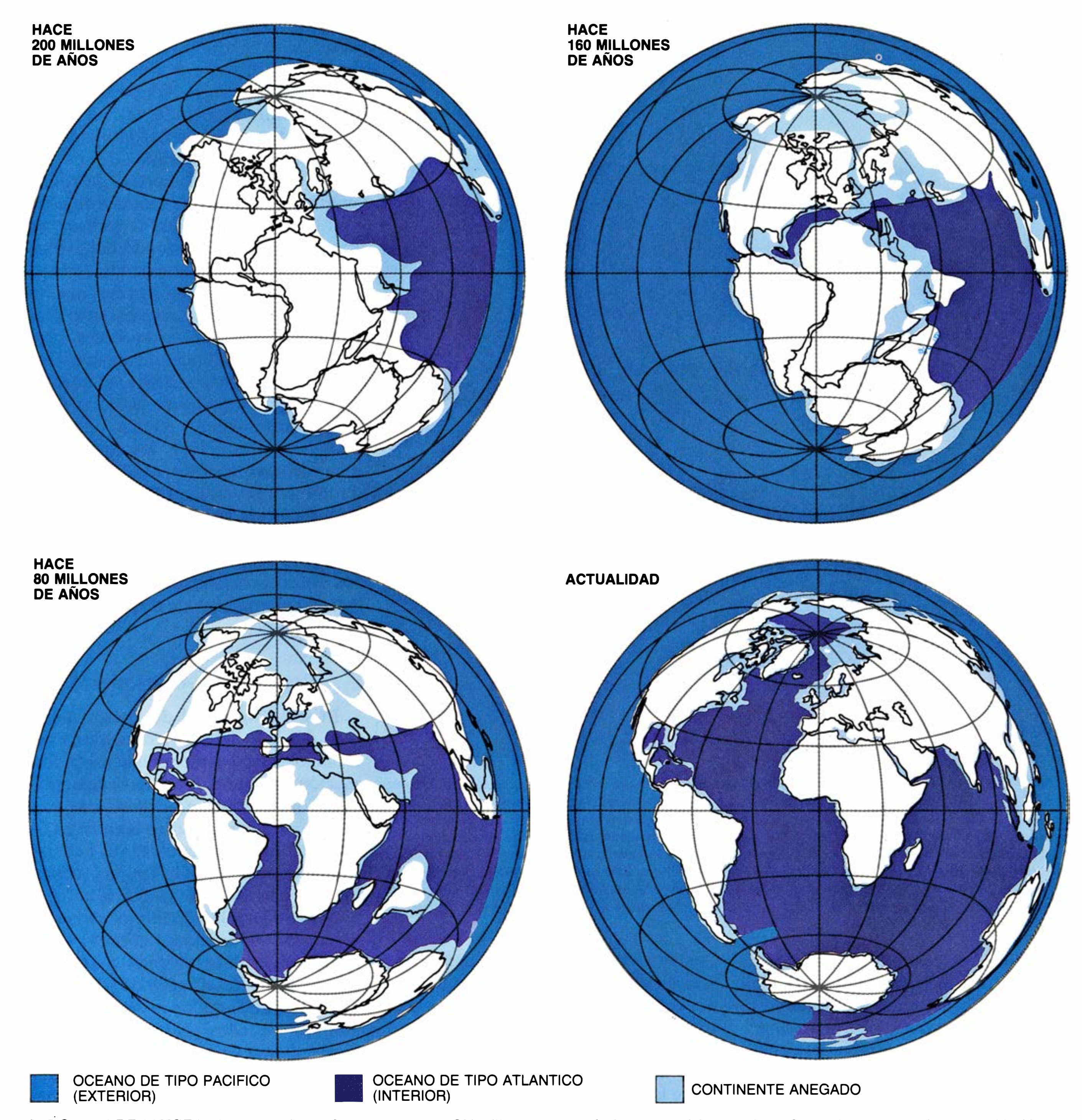
Este marco teórico y sus corolarios permiten ensartar en un mismo hilo argumentativo múltiples observaciones realizadas en ámbitos muy dispares. Por ejemplo, ayudan a comprender la cronología de los cambios extremos de nivel del mar ocurridos durante los últimos 570 millones de años. Gracias a ese marco, también se explican y ponen en relación otros acontecimientos de los últimos 2500 millones de años: los períodos de intensa construcción de montañas, los episodios de glaciación y los cambios de la naturaleza de la vida en la Tierra. Tal como lo concebimos, el ciclo del supercontinente es un proceso impulsor de primer orden que ha

R. DAMIAN NANCE, THOMAS R. WORSLEY y JUDITH B. MOODY han reunido en una colaboración particularmente estrecha sus respectivas especialidades en tectónica, oceanografía y geoquímica. Worsley convive, durante los días laborables, con la familia de Nance en Athens, Ohio, en cuya universidad enseñan ambos, y pasa los fines de semana en Columbus, Ohio, donde Moody preside la compañía J. B. Moody and Associates; Moody y Worsley se casaron hace nueve años. Nance se doctoró en 1978 por la Universidad de Cambridge y enseñó en la Universidad San Francisco Javier de Nueva Escocia; en 1980 se trasladó a Ohio. Worsley se recibió de doctor por la Universidad de Illinois en 1970; se instaló en Ohio en 1977, después de dar clases en la Universidad de Washington. Moody se doctoró por la Universidad McGill en 1974.

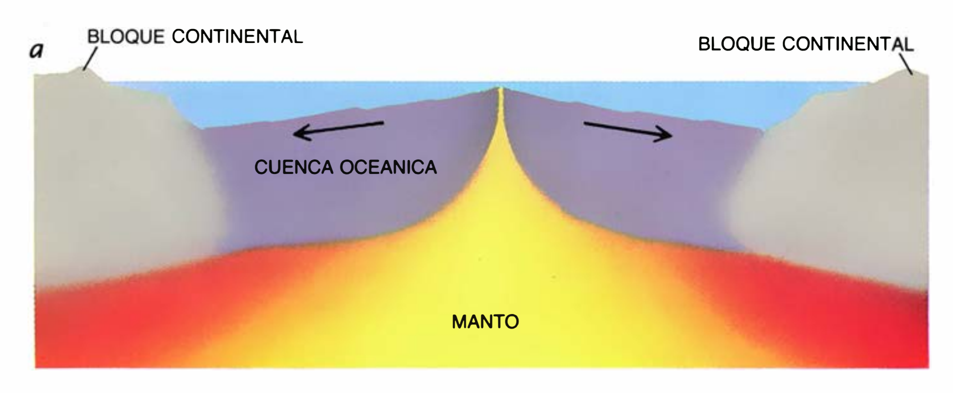
puesto en marcha no pocos de los principales avances de la historia geológica.

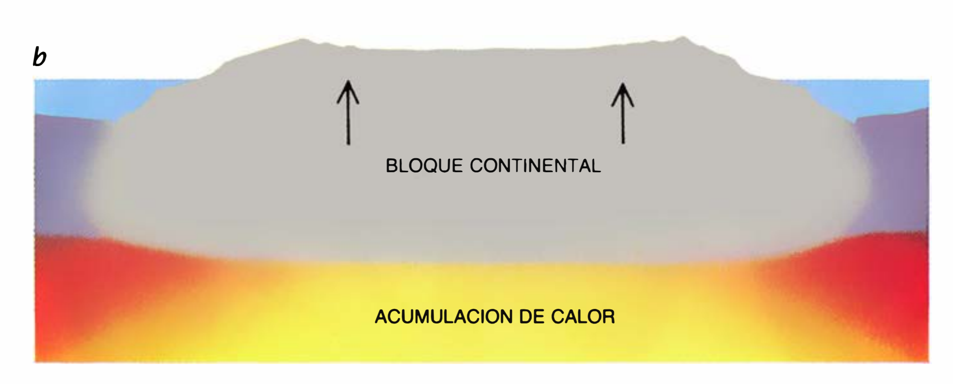
Apertura de océanos

Nuestro modelo se asienta en una descripción anterior de los movimientos episódicos de las placas, el ciclo de Wilson. Formulado por J. Tuzo Wilson, del Centro de Ciencias de Ontario, el ciclo de Wilson es el proceso mediante el cual los continentes se fragmentan y forman cuencas oceánicas, cerrándose luego las cuencas y reuniéndose los continentes. En la primera fase del ciclo se forman "puntos calientes" volcánicos en el interior del continente; a continuación, los puntos calientes se van conectando en valles de fractura, o rifts, a lo largo de los cuales acaba rompiéndose el continente. Cuando así ocurre, los valles de fractura se ensanchan y generan un océano nuevo, conforme mana, por el interior de aquéllos, material caliente del manto y se forma el fondo del mar. Los fragmentos se distancian, alejándose de esos "centros de expansión" elevados mientras persiste la salida de material del manto.



1. ROTURA DE PANGEA, el supercontinente formado hace unos 300 millones de años; el episodio dominó la historia geológica posterior. Hace unos 200 millones de años, el calor acumulado bajo el supercontinente lo rompió en valles de fractura que al cabo se abrirían en océanos. El crecimiento de esos jóvenes océanos someros a expensas del superocéano más viejo y profundo elevó el nivel del mar, anegando parcialmente las masas continentales. El nivel del mar alcanzó su cota máxima hace unos 80 millones de años; luego bajó, a medida que envejecieron y se hicieron más profundos los nuevos océanos, estableciéndose la geografía actual del planeta. Según la hipótesis que postulan los autores, Pangea sería el supercontinente más reciente de una sucesión que se fue rompiendo y reensamblando durante los últimos 2600 millones de años; tal ciclo "supercontinental" ha determinado la geología y el clima de la Tierra y ha fomentado la evolución biológica. Los mapas se basan en estudios de A. G. Smith, de la Universidad de Cambridge, y J. C. Briden, de la Universidad de Leeds.







2. NIVEL DEL MAR respecto de los continentes; está controlado por varios factores tectónicos. Uno de ellos es la edad del fondo marino, creado por la ascensión de material del manto en los "centros de expansión" mesoceánicos (*a*). A medida que se expande, el fondo se enfría, gana densidad y se hunde; en consecuencia, los océanos más viejos son más profundos y, por tanto, conforme aumenta su edad media, desciende el nivel del agua. La acumulación de calor bajo la corteza continental estacionaria (*b*) altera también el nivel del mar, pues hace flotar el continente. Sobre el nivel del mar influye asimismo la compresión (*c*) o extensión (no se indica) de los continentes. Cuando los continentes se comprimen, aumenta el área total que ocupa el océano mundial, mientras que se mantiene constante el volumen de agua: el nivel del mar desciende.

Al envejecer, el material que forma el fondo oceánico se enfría, se vuelve más denso y se hunde, aumentando la profundidad del océano. Unos 200 millones de años después de la formación del primer rift, la porción más antigua del nuevo fondo oceánico (la directamente adyacente a los fragmentos continentales) ha adquirido ya tal densidad que se hunde bajo la corteza continental: se subduce. Los procesos de subducción cierran entonces el océano y los continentes vuelven a aproximarse. Andando el tiempo, los continentes chocan y tornan a asociarse; las fuerzas compresivas de colisión levantan cordilleras.

Bajo la óptica de los ciclos de Wilson, se advierte un notable contraste entre la evolución de los márgenes continentales que rodean el Atlántico norte y la de los márgenes del Pacífico. Los del Atlántico norte han atravesado una serie de ciclos de Wilson durante los últimos 1000 millones de años; las regiones que circundan el Pacífico parece que no han experimentado ninguno. En otras palabras, en las inmediaciones del Atlántico norte actual, los océanos se han abierto y cerrado reiteradamente, mientras que en las del Pacífico se ha mantenido siempre un solo océano.

Así, pues, en nuestro modelo el Pacífico el descendiente del hemisferio oceánico ha rodeado las sucesivas reencarnaciones del supercontinente; todos los ciclos de Wilson registrados en lo que hoy es la región noratlántica consistieron en la rotura y reensamblaje de un supercontinente. Cabe esperar, por consiguiente, que el Atlántico se vuelva a cerrar, reuniendo de nuevo los continentes en un supercontinente rodeado por el superocéano.

En la actualidad, la corteza del fondo marino del Pacífico se subduce bajo todos los continentes que la rodean; en cambio, casi todo el fondo del Atlántico está unido a bloques continentales. En nuestro marco, ello significa que los continentes se hallan todavía en el proceso de dispersión, tras la rotura, ocurrida hace 200 millones de años, del supercontinente más reciente, el que Alfred Wegener, padre de la teoría de la deriva continental, bautizó Pangea, "toda la tierra". Hoy, los continentes se aproximan a su dispersión máxima. Pronto (en la escala geológica de tiempo) la corteza del Atlántico habrá envejecido lo suficiente y adquirido la densidad necesaria para hundirse bajo los continentes circundantes, dando comienzo al proceso que cerrará la cuenca oceánica.

Regularidad sorprendente

El segundo puntal de nuestra hipótesis del ciclo del supercontinente es la cronología de diversos episodios de formación de montañas y de fragmentación continental. Se advierte una sorprendente regularidad en las edades de las cordilleras susceptibles de haberse levantado por acción de las fuerzas compresivas que acompañan a los choques continentales. Esta modalidad de formación de montañas conoció especial intensidad en diversas partes del mundo durante seis períodos distintos: hace unos 2600 millones de años, 2100 millones de años, entre hace 1800 y 1600 millones de años, hace 1100 millones de años, 650 millones de años y hace 250 millones de años. La cronología revela cierta periodicidad: el intervalo entre dos de esos períodos cualesquiera de orogénesis intensamente compresiva abarca de 400 a 500 millones de años.

Más aún, diríase que, unos 100 mi-

llones de años después de cada período de levantamiento de montañas, se registró un episodio de fragmentación. Muchas rocas derivadas del manto —que podrían haberse producido al manar magma por las grietas que dejó abiertas la fragmentación— datan de tiempos centrados en torno a hace 2500, 2000, entre 1700 y 1500, 1000 y 600 millones de años. Por supuesto, a la orogenia de hace 250 millones de años le sucedió el cuarteamiento y posterior rotura de Pangea.

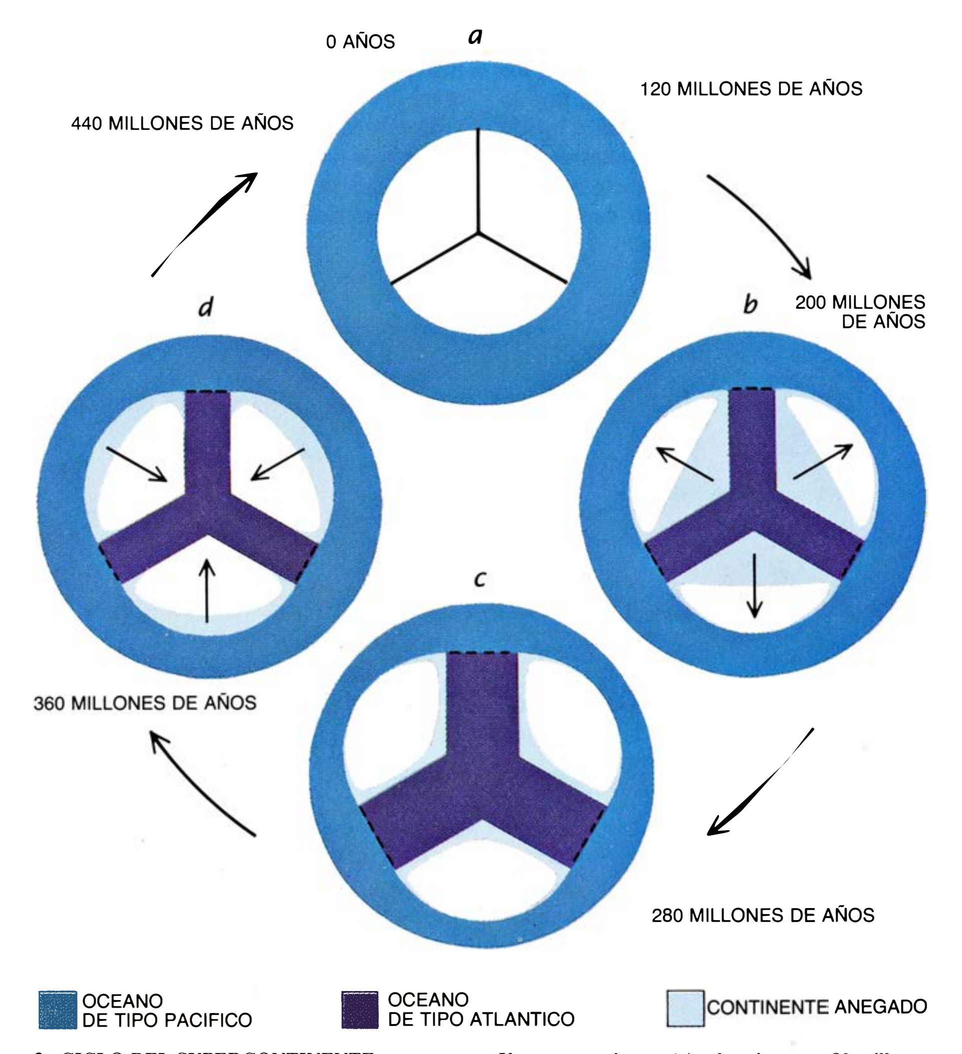
Tales regularidades indican que los supercontinentes se crean en el transcurso de un proceso cíclico, cuyo período completo dura unos 500 millones de años. Examinando esos y otros registros geológicos y tomando en consideración el ritmo de expansión del fondo marino de los océanos actuales y otros factores, hemos determinado una cronología más precisa del ciclo del supercontinente. Según nuestros cálculos, contando a partir del inicio de la separación de los fragmentos del supercontinente (probablemente unos 40 millones de años después de comenzar el cuarteamiento) los fragmentos tardan unos 160 millones de años en alcanzar su dispersión máxima, empezando entonces la subducción en los océanos nuevos. Una vez iniciado el movimiento hacia la reunificación, habrán de transcurrir otros 160 millones de años para que se reconstruya el supercontinente; éste perdurará unos 80 millones de años, en cuyo transcurso se acumulará bajo él calor suficiente para provocar la fracturación. Al cabo de 40 millones de años, el cuarteamiento conducirá a otra rotura, 440 millones de años después de la del ciclo precedente.

Efectos sobre el nivel del mar

¿Cómo comprobar la verosimilitud de ese hipotético ciclo? Es probable que ejerza efectos importantes sobre el nivel del mar; de ellos hay registros geológicos claros, correspondientes a los últimos 570 millones de años. Suponiendo que no varíe la cantidad total de agua de los océanos mundiales, el nivel del mar (respecto de la masa continental) viene determinado en gran medida por dos factores: el volumen total de las cuencas oceánicas del planeta, que depende en parte de la profundidad media que tenga el fondo marino, y la elevación relativa de los continentes. El ciclo del supercontinente conllevaría la creación y destrucción de cuencas oceánicas y el ascenso térmico de continentes; por consiguiente, debería ejercer una profunda influencia en ambos factores.

Al progresar la expansión del fondo oceánico, a medida que se aleja de las dorsales mesoceánicas, el material que constituye el fondo se enfría y se hunde y su profundidad aumenta en proporción a la raíz cuadrada de su edad. Wolfgang H. Berger y Edward L. Winterer, de la Institución Scripps de Oceanografía, han calculado las variaciones que sufriría la edad media del fondo del océano mundial en el transcurso de la rotura de un supercontinente. Antes de la fragmentación, la edad media del océano debe mantenerse constante, pues en el superocéano que rodea el supercontinente se crea nuevo fondo marino con un ritmo aproximadamente igual al de destrucción, por subducción, de fondo marino viejo bajo las masas emergidas. Durante la rotura, el superocéano sujeto a subducción "de tipo pacífico" se sustituirá por una proporción creciente de océanos no subducentes, "de tipo atlántico". Más tarde, cuando el supercontinente empiece a reunificarse, esos océanos "interiores" se destruirán por subducción y volverán a remplazarse por océano de tipo pacífico. Todos esos procesos repercuten sobre la edad media del fondo del océano mundial.

Por término medio, inmediatamente después de la rotura de un supercontinente, y conforme los océanos jóvenes de tipo atlántico vayan sustituyendo el océano más viejo de tipo pacífico, el fondo del océano mundial debería volverse progresivamente más joven y somero. Cuando los océanos de tipo atlántico alcancen la misma edad media que el océano de tipo pacífico, la tendencia debería invertirse: el crecimiento de océanos de tipo atlántico progresivamente más viejos debería causar el envejecimiento y ahondamiento del fondo del océano mundial. La mayor profundidad media se registraría al alcanzar los océanos atlánticos su edad



3. CICLO DEL SUPERCONTINENTE, en esquema. Un supercontinente (*a*) sobrevive unos 80 millones de años, hasta que la acumulación de calor provoca en él la formación de valles de fractura y, unos 40 millones de años más tarde, se despedaza en continentes separados. Los continentes se van alejando unos de otros (*b*) y, al cabo de otros 160 millones de años, alcanzan su grado máximo de dispersión (*c*). Luego retroceden (*d*) y vuelven a constituir el supercontinente (*a*). El ciclo completo dura unos 440 millones de años.

media máxima, justo antes de empezar la subducción. Entonces, a medida que se subdujeran las áreas más viejas de los océanos de tipo atlántico y los océanos se cerraran, el fondo del océano mundial debería volverse de nuevo más joven y somero.

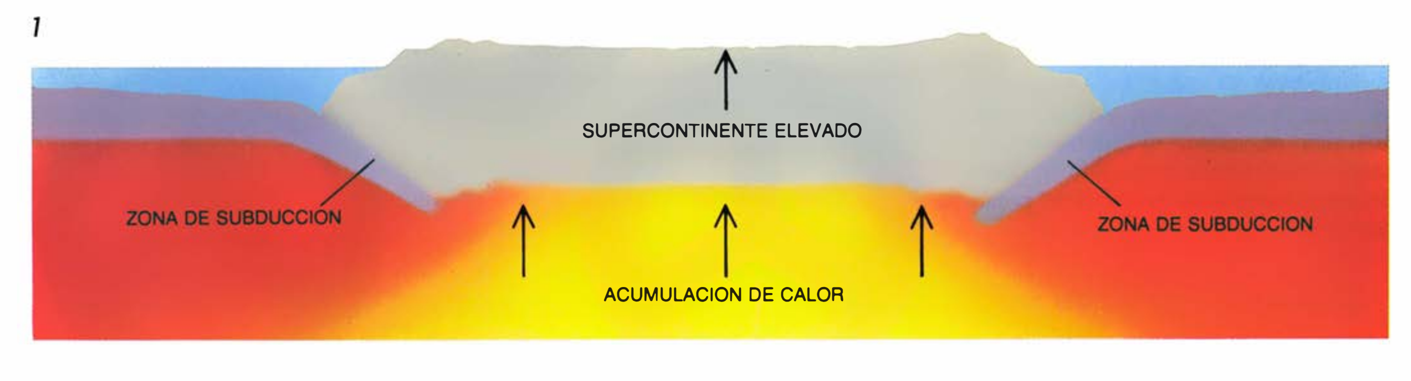
Los cálculos del nivel del mar basados en estos parámetros sugieren que las plataformas continentales del supercontinente deberían anegarse; en efecto, la cuenca oceánica que rodea el supercontinente es más joven y somera que el fondo del océano mundial actual. Sin embargo, hay que agregar un segundo factor al análisis: en qué cuantía levanta al supercontinente el calor que se acumula bajo el mismo. Si el supercontinente se eleva hasta una altura suficiente, el nivel del mar se mantendrá bajo con respecto a la masa continental, incluso en el caso de un fondo marino somero.

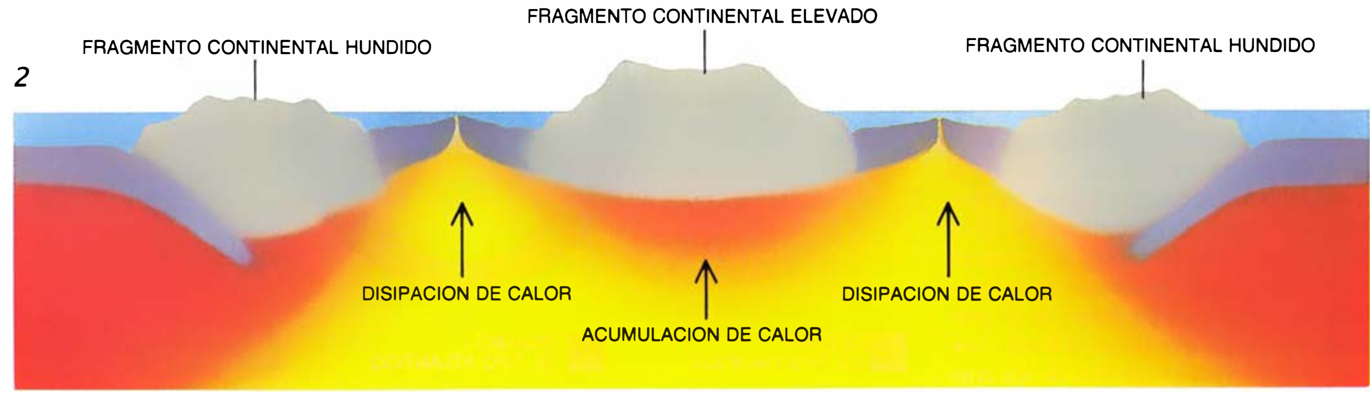
El análisis de la situación actual de Africa nos permite estimar hasta dónde llega la acumulación térmica en el levantamiento de los supercontinentes. La masa africana ha permanecido esencialmente estacionaria a lo largo de los últimos 200 millones de años, por lo menos, tiempo durante el cual se ha ido acumulando bajo ella gran cantidad de calor del manto. (Parte de ese calor se está liberando por los valles de fractura que hoy se forman en varias zonas del continente.) Comparando la altura, sobre el nivel del mar, de la ruptura de pendiente de la plataforma de Africa (el borde real del continente) con la altura de ese borde en otros continentes, se comprueba que el levantamiento térmico ha elevado Africa unos 400 metros. Cabe, pues, esperar que los supercontinentes sufran alzamientos de origen térmico de 400 metros, por lo menos.

En la emersión de los supercontinentes intervienen también otros factores. (Llámase emersión a la elevación respecto del nivel del mar.) Por ejemplo, las colisiones que tienen lugar durante el ensamblaje del supercontinente deberían comprimir y aumentar el grosor de la corteza continental, acortando la extensión emergida total de la Tierra. Ello incrementaría el área total de las cuencas oceánicas y rebajaría en consecuencia el nivel del mar. Por el contrario, el estiramiento y la extensión corticales que acompañan la rotura de los supercontinentes reducirían el área total de la cuenca oceánica mundial y provocarían el ascenso del nivel del mar.

Combinando todos esos componentes, nos es dado determinar en qué medida variaría el nivel del mar en el transcurso de las distintas fases del ciclo del supercontinente. Se ha señalado ya que, durante la persistencia de un supercontinente, el nivel del mar debe encontrarse relativamente bajo. Al romperse la masa, el nivel del mar subiría: porque los fragmentos continentales se estirarían y se hundirían por acción térmica y porque la rotura remplazaría océano viejo de tipo pacífico por océano atlántico joven. El nivel del mar seguiría ascendiendo durante unos 80 millones de años, a medida que los océanos más jóvenes fueran ocupando una fracción progresivamente mayor del océano mundial. En ese punto, acompañando al envejecimiento y la expansión de los océanos atlánticos, el nivel del mar descendería durante otros 80 millones de años, aproximadamente, hasta que éstos empezaran a subducirse.

Al iniciarse la asociación de los continentes, subiría el nivel de las aguas, por efecto de la subducción de corteza más vieja, de tipo atlántico. El ascenso proseguiría durante otros 80 millones de años, hasta que el supercontinente empezara a reensamblarse. Entonces, al chocar los continentes y levantarse térmicamente el supercontinente en acreción, la altura del mar descendería durante unos 80 millones de años. Formado el supercontinente, el nivel del mar permanecería estático otros 120





4. EL CALOR controla la elevación de los supercontinentes y de sus fragmentos. El supercontinente (*1*), rodeado de zonas de subducción (donde el suelo marino se introduce bajo el continente), permanece estacionario respecto del manto subyacente. Bajo él se acumula calor (pues la corteza continental lo conduce peor que la oceánica), que lo eleva por efecto de flotación. Roto ya el supercontinente (*2*), los fragmentos se hunden conforme van distanciándose. Si un fragmento permanece en el lugar que ocupaba el supercontinente se mantendrá elevado. La actual masa del continente africano constituye un fragmento de ese tipo.

millones de años, hasta que el supercontinente volviera a disgregarse.

Esas predicciones sobre la variación del nivel del mar encajan con el registro geológico de los últimos 570 millones de años, primera fecha en que puede determinarse la altura de las aguas con suficiente grado de confianza. En particular, la cronología y las magnitudes relativas de los cambios del nivel del mar que predice el modelo coinciden con el registro conservado. Por supuesto, los valores absolutos difieren entre continentes; el modelo da promedios planetarios.

Comprobación del modelo

Se obtienen asimismo datos sobre el ciclo del supercontinente examinando los isótopos de azufre y carbono hallados en determinados sedimentos marinos. (Son isótopos los átomos de un mismo elemento que tienen pesos atómicos diferentes.)

Durante los estadios iniciales de la rotura del supercontinente, resulta verosímil que éste albergue varios rifts marinos que, como el moderno mar Rojo, se hallen débilmente conectados al océano mundial. Esos rifts pueden experimentar un proceso continuo de evaporación parcial, en el que determinados elementos, como el azufre, se separan del agua marina precipitando en forma de minerales. Cuando se evapora agua marina sulfurosa, el azufre pesado (de peso atómico 34) precipita antes de que lo haga el ligero (de peso atómico 32).

Si en uno de esos valles de fractura sujetos a evaporación se mezclan continuamente sus aguas con las del océano mundial, el rift actuará como sumidero del azufre pesado: tenderá a extraer azufre pesado del océano y enterrarlo en sedimentos evaporíticos. Así, el océano mundial se empobrecerá bastante en azufre pesado y se enriquecerá en azufre ligero. Cabe esperar, por tanto, que en el conjunto de sedimentos derivados del océano mundial durante el período del supercontinente los niveles de azufre ligero sean altos y, bajos, los de azufre pesado. Eso es precisamente lo que se ha encontrado en sedimentos de alta mar formados hace 200 y 600 millones de años, es decir, durante los dos últimos episodios de supercontinente.

También los isótopos del carbono informan sobre los supercontinentes. En solución, el más ligero (carbono 12) se difunde antes que el más pesado (carbono 13), por lo que aquél cuenta con más probabilidades de ser absorbido por los organismos e incorporarse a su biomasa; los organismos constituyen, pues, un sumidero del carbono ligero. Durante los períodos de bajo nivel del mar, la tasa de productividad orgánica del océano mundial será elevada: al encontrarse emergida una extensión mayor de corteza continental, se incrementa la disponibilidad de nutrientes que, como el fósforo y el nitrógeno, se erosionan de la corteza continental y los transportan al mar los cursos de agua.

Por consiguiente, cuando el nivel del mar esté bajo, se incorporará a los organismos mayor cantidad de carbono (en especial del isótopo ligero) y el agua del océano mundial quedará relativamente empobrecida en carbono ligero y enriquecida en el pesado. El examen de sedimentos derivados del agua marina, caliza (carbonato cálcico), por ejemplo, habría de revelar entonces la presencia de niveles altos de carbono pesado y bajos de carbono ligero si los sedimentos se produjeron durante un período de nivel bajo del mar. En sedimentos comparables producidos durante un período de nivel del mar alto, se incrementaría la proporción de carbono ligero y se reduciría la de carbono pesado. En efecto, el cociente entre carbono pesado y carbono ligero de esos sedimentos encaja perfectamente con las predicciones de nuestro modelo durante los últimos 600 millones de años.

Clima y vida

Quizás el efecto más importante del ciclo del supercontinente estribe en su influencia sobre el clima y la vida. En su mayor parte, ese efecto derivará de las variaciones del nivel del mar provocadas por los procesos de rotura, dispersión y reensamblaje continentales.

Cuando el nivel del mar es bajo —es decir, cuando sólo emerge un continente o cuando los diversos continentes se encuentran muy dispersos (como ocurre ahora) y el fondo del océano mundial ha alcanzado su edad máxima— quedan expuestos a la meteorización y erosión grandes cantidades de silicatos (cálcicos, por ejemplo) de la corteza continental; se disuelven y los ríos los llevan hasta el océano mundial. Cuando se mezclan en el agua marina, los silicatos se combinan con dióxido de carbono disuelto y producen precipitados sólidos [véase "Evolución del clima en los planetas terrestres", por James F. Kasting, Owen B. Toon y James B. Pollack; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1988]. Por ejemplo, los silicatos cálcicos pueden combinarse con dióxido de carbono y producir calcita (caliza) y cuarzo; este proceso extrae de la atmósfera dióxido de carbono.

El dióxido de carbono de la atmósfera colabora a que la Tierra retenga el calor que recibe de la radiación solar. Cuando se extrae de ella y se acumula en sedimentos oceánicos, se reduce ese efecto térmico "de invernadero" y el clima mundial se enfría. Entonces, si existe una masa continental emergida lo bastante cerca del polo, se formarán glaciares (como los que encontramos hoy en la Antártida y Groenlandia).

Las glaciaciones provocan diversos efectos de importancia sobre el clima planetario. Por una parte, extraen agua de las cuencas oceánicas, provocando un descenso aún mayor del nivel del mar. Además, las glaciaciones agrandan la circulación y mezcla del océano mundial. En ese contexto, buena parte de la circulación oceánica de la tierra actual está impulsada por una "máquina de calor" global en la que el agua cálida y salada de los trópicos y los subtrópicos fluye hacia el polo, donde cede calor, cae al fondo y regresa al ecuador [véase "Polynyas en el océano Glacial Antártico", por Arnold L. Gordon y Josefino C. Comiso; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 1988]. Con esa mezcla del agua superficial y el agua profunda, la máquina de calor distribuye oxígeno y otros nutrientes por todo el océano. El hielo del polo mantiene frías las aguas polares y sostiene la diferencia de temperatura que impulsa la máquina de calor.

Conjugándose con la circulación vertical, el incremento del aporte de nutrientes procedentes de los continentes eleva la productividad biológica en los períodos de bajos niveles marinos. La alta productividad atraparía más carbono aún en la materia orgánica, reduciendo todavía más la concentración de dióxido de carbono atmosférico.

Los ambientes más acogedores para la vida marina son las plataformas continentales, donde abundan los nutrientes procedentes de tierra firme y donde las profundidades someras permiten que la luz solar penetre hasta el fondo. Sin embargo, cuando la productividad biológica es alta, no existen esos ambientes, pues el bajo nivel del mar ha expuesto la plataforma. Se extinguirán entonces muchas especies bien arraigadas, sacando partido de ello otras nuevas e innovadoras. No por ello es la vida particularmente diversa. Antes bien, esas condiciones —altos niveles de nutrientes pero pocos nichos ambientales— favorecen los ecosistemas

en los que una gran cantidad de biomasa se concentra en determinadas especies prósperas.

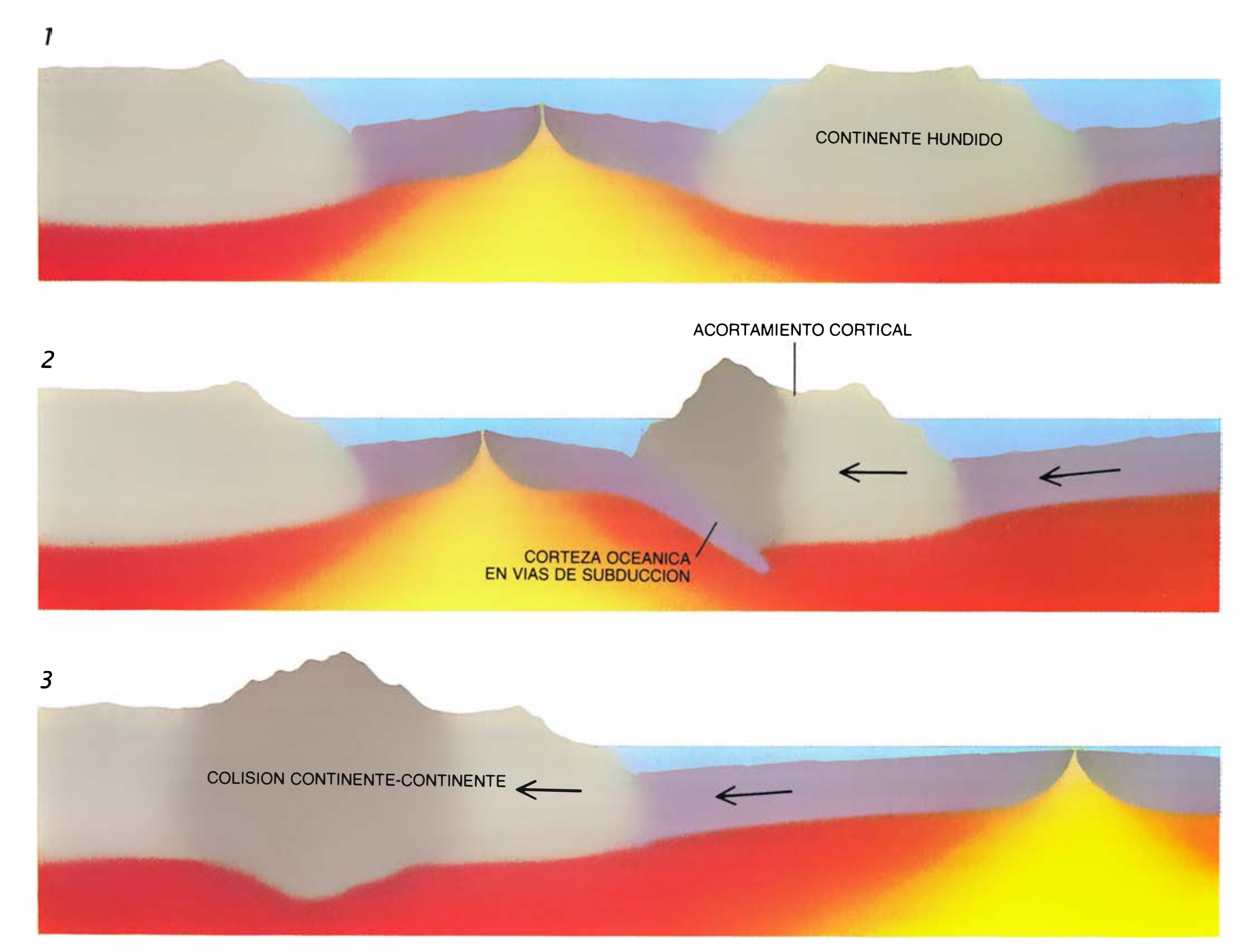
El clima tras la rotura

Entre los efectos del descenso del nivel de las aguas se cuentan, por consiguiente, la propensión hacia la glaciación, fuerte circulación vertical en el océano mundial, elevada productividad biológica, innovación biológica y un bajo grado de diversidad biológica. ¿Cuáles serían los efectos de la elevación del nivel marino que cabe esperar inmediatamente después de la rotura o inmediatamente antes del reensamblaje de los supercontinentes?

Cuando los continentes se anegan, es relativamente pequeña la cantidad de silicatos de que se dispone para secuestrar dióxido de carbono atmosférico en los depósitos del fondo marino. El material caliente del manto que mana de los centros de expansión del fondo del mar libera dióxido de carbono al océano, y desde aquí hacia la atmósfera. La propia subducción de corteza oceánica y la consiguiente fusión de depósitos de calizas en los sedimentos subducidos liberan aún más dióxido de carbono a la atmósfera en los volcanes que caracterizan las zonas de subducción.

Por consiguiente, crecerán los niveles atmosféricos de dióxido de carbono y el clima terrestre se caldeará. Se fundirán los casquetes de hielo polar, elevándose el nivel del mar y anegándose extensiones mayores de los continentes. La ausencia de hielo polar frenará la circulación vertical y horizontal del océano mundial, lo que a su vez provocará el inicio de un estancamiento: disminuirá la concentración de oxígeno y de nutrientes en las aguas oceánicas y, con ello, la productividad biológica. Por otra parte, la corteza continental inundada brindará una vasta extensión de mares someros, los que mejor acogen la vida. Los ecosistemas resultantes se parecerán a los de los trópicos actuales, de clima cálido, niveles de nutrientes bajos y dotados de un buen número de nichos ambientales. Igual que los trópicos de nuestros días, esos ecosistemas se caracterizarían por la baja productividad y la gran diversidad de especies.

¿En qué medida corrobora esas predicciones el registro de los climas y formas de vida del pasado? Una de las confirmaciones más impresionantes de nuestro modelo la dan los registros de glaciación. Todos los episodios de glaciación que se conocen en la historia de la tierra tuvieron lugar en momentos en que, según nuestro modelo, el nivel del mar se encontraba bajo. Pero no es cierto el caso contrario: no siempre que ha bajado el nivel del mar se ha producido un episodio de glaciación; es probable que en ocasiones no hubiera



5. ACORTAMIENTO de los bloques continentales; incrementa el área total que cubre el océano mundial y, por esa razón, rebaja el nivel del mar planetario. Inmediatamente después de producirse la rotura del supercontinente (*1*) el nuevo fondo marino (*centro, a la izquierda*) se adosa a fragmentos continentales. Posteriormente, cuando se cierra la nueva cuenca oceánica (*2*), el continente se desplaza sobre el fondo marino y lo subduce; las fuerzas compresivas resultantes acortan el continente y levantan cordilleras, provocando el descenso del nivel del mar, pues reducen la extensión total de la Tierra. Más tarde, cuando los continentes colisionen entre sí en la creación de otro supercontinente (*3*), la corteza continental se acortará de nuevo y el nivel del océano descenderá aún más.

ningún continente emergido en las inmediaciones del polo.

El registro biológico resulta algo más ambiguo, por varias razones. Quizás la más importante sea la heterogeneidad del registro fósil en el transcurso del tiempo. El registro se basa principalmente en depósitos enterrados en la corteza continental, sepultados cuando los niveles del mar eran altos. En tiempos de aguas bajas, los organismos solían vivir en alta mar, más allá de las plataformas continentales emergidas; escasean los depósitos que registran esos períodos, que probablemente se destruyeron después, por subducción del fondo oceánico. Pese a ello, las pruebas de que se dispone tienden a confirmar nuestra hipótesis.

Pruebas biológicas

Por ejemplo, los escasos registros geológicos de vida marina correspondientes a la época del supercontinente más reciente, Pangea, indican que la diversidad de especies era baja, según cabía esperar del descenso del nivel del océano. Además, el período de anegamiento que siguió a la rotura de Pangea se caracterizó por una gran diversidad de especies.

Remontándonos aún más, la rotura del supercontinente anterior, hace unos 600 millones de años, vino marcada por la primera aparición de animales provistos de caparazón de que se tenga registro. Durante los tiempos que siguieron a esa rotura se produjo una eclosión de diversidad [véase "La radiación de la vida animal", por Mark A. S. McMenamin; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1987]. En particular, los animales con caparazón se diversificaron en un sinfín de formas.

Antes, los primeros animales pluricelulares conocidos habían aparecido en sedimentos marinos de unos mil millones de años de antigüedad. Según nuestro modelo, esos sedimentos se habrían depositado inmediatamente después de la rotura de un supercontinente. Es muy posible que tal innovación biológica se produjera durante la existencia del supercontinente, pero no quedó registrada hasta que se rompió y ascendieron los niveles marinos, anegando las plataformas continentales.

Puede vincularse al ciclo del supercontinente una innovación aún más antigua. Hace unos 2100 millones de años, justo antes de producirse una supuesta rotura supercontinental, las algas verdeazuladas, o cianofíceas, desarrollaron por vez primera heterocistes, las células que posibilitaron la fijación de nitrógeno (la escisión de moléculas de nitrógeno y la unión de los átomos constituyentes con carbono de materia orgánica) en presencia de oxígeno atmosférico. Sin heterocistes u otros mecanismos parecidos, el oxígeno, que se enlaza a los átomos de nitrógeno, interrumpe la reacción química de fijación. Por aquel entonces la atmósfera apenas comenzaba a retener oxígeno; la innovación permitió que muchos organismos posteriores —los predecesores de las plantas fotosintéticas actuales— sobrevivieran en la nueva atmósfera oxigenada, que de otro modo les habría resultado venenosa.

Un nuevo marco

La hipótesis del ciclo del supercontinente viene a constituir un nuevo marco, una forma nueva de concebir la historia geológica de la Tierra. Sugiere que los macroprocesos de la tectónica de placas están regidos en lo fundamental por un mismo mecanismo regular, cíclico, no por la casualidad.

El ciclo del supercontinente representa también un modo nuevo de interpretar la historia de la vida en la Tierra. Los efectos climáticos a gran escala desencadenados por las diversas fases del ciclo del supercontinente —inundación o emersión continental, glaciación y circulación oceánica, estancamiento del océano mundial— han dirigido muchas innovaciones biológicas que han regido el curso ulterior de la evolución. El ciclo del supercontinente constituye, en cierto modo, el pulso de la Tierra: en cada latido, el clima, la geología y la población de organismos progresan y se renuevan.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE TWO PHANEROZOIC SUPERCYCLES. Alfred G. Fisher en *Catastrophes and Earth History*, dirigido por W. A. Berggren y John Van Couvering. Princeton University Press, 1983.

GLOBAL TECTONICS AND EUSTASY FOR THE PAST 2 BILLION YEARS. Thomas R. Worsley, Damian Nance y Judith B. Moody en *Marine Geology*, vol. 58, n.º 3/4, págs. 373-400; 25 de julio de 1984.

POST-ARCHEAN BIOCHEMICAL CYCLES AND LONG-TERM EPISODICITY IN TECTONIC PROCESSES. R. Damian Nance, Thomas R. Worsley y Judith B. Moody en *Geology*, vol. 14, n.º 6, págs. 514-518; junio de 1986.

TECTONIC CYCLES AND THE HISTORY OF THE EARTH'S BIOCHEMICAL AND PALEOCEANOGRAPHIC RECORD. Thomas R. Worsley, R. Damian Nance y Judith B. Moody en *Paleoceanography*, vol. 1, n.º 3, págs. 233-263; septiembre de 1986.

Aritmética y azar

Resulta imposible demostrar si un miembro cualquiera de una familia de ecuaciones algebraicas tiene un número finito o infinito de soluciones: la cifra varía al azar y, por tanto, escapa al razonamiento matemático

Gregory J. Chaitin

¿Qué más verdadero que el aserto de que 2 más 2 son 4? Desde la Grecia clásica, los matemáticos mantienen el convencimiento de que poco o nada hay tan inequívoco como un teorema demostrado. En efecto, los enunciados matemáticos de veracidad demostrable se han considerado más sólido fundamento de un sistema de pensamiento que cualquier máxima moral, e incluso que los objetos físicos. En el siglo XVII, el matemático y filósofo alemán Gottfried Wilhelm Leibniz llegó a imaginar nada menos que un "cálculo" del razonamiento, merced al cual todas las disputas podrían un día zanjarse con las palabras "Caballeros, ¡calculemos!". A principios de nuestro siglo, la lógica simbólica había progresado hasta extremo tal, que el matemático alemán David Hilbert declaró que todas las cuestiones matemáticas eran en principio decidibles, y en esa confianza se puso a codificar de una vez por todas los métodos de razonamiento matemático.

Tan gozoso optimismo habría de saltar hecho trizas por los sorprendentes y profundos descubrimientos de Kurt Gödel y Alan M. Turing, realizados en la década de 1930. Gödel demostró que ningún sistema finito de axiomas y métodos de razonamiento podría abarcar la totalidad de las propiedades matemáticas de los enteros positivos. Turing dio a la ingeniosa y complicada demostración de Gödel una forma más accesible. Mostró que el teorema de incompletitud de aquél equivalía al aserto de que no podía existir un método general para decidir si un programa de ordenador llegará alguna vez a detenerse, esto es, si llegará a ser causa de que el ordenador suspenda su funcionamiento. Evidentemente, en el caso de que un determinado programa sí sea causa de que el ordenador se detenga, podrá demostrarse sin más que ejecutarlo. La dificultad reside en establecer la no detención en el caso de un programa arbitrario.

Recientemente, he avanzado un paso más en la senda que trazaron Gödel y Turing. Por traducción de un determinado programa de ordenador a ecuación algebraica, de un tipo conocido ya por los griegos de la antigüedad clásica, he puesto de manifiesto la existencia de aleatoriedad en la teoría de números, una rama de la matemática pura. De mi trabajo se desprende (retomando la metáfora de Einstein) que, a veces, Dios juega a los dados con números enteros.

Tal resultado, que forma parte del cuerpo de doctrina conocido por teoría de información algorítmica, no tiene por qué ser motivo de pesimismo; no es presagio de anarquía o desaparición de las leyes matemáticas. (En realidad, casi todos los matemáticos siguen trabajando en sus problemas de igual manera que venían haciendo). Significa que, en ciertas situaciones, podría resultar forzoso aplicar leyes matemáticas de naturaleza diferente, a saber, leyes estadísticas. De igual manera que es imposible la predicción exacta del momento en que un átomo va a desintegrarse radiactivamente, a veces las matemáticas se ven impotentes para responder a determinadas cuestiones. No obstante lo dicho, los físicos siguen elaborando predicciones fiables relativas a promedios correspondientes a grandes conjuntos de átomos. Entra dentro de lo posible que los matemáticos se vean obligados, en ciertas ocasiones, a dar a sus problemas un enfoque similar.

Mi trabajo constituye una prolongación natural del realizado por Turing. Ahora bien, mientras que éste abordó el problema de si un programa arbitrario llegaría a la postre a detenerse o no, yo estudio la probabilidad de que un ordenador de uso general detenga su funcionamiento cuando el programa se elige completamente al azar. ¿A qué me refiero al decir "se elige completamente al azar"? Dado que, en su nivel fundamental, todo programa puede reducirse a una secuencia de dígitos binarios, o bits (cada uno de los cuales puede tomar valor 0 o 1), que el soporte físico del ordenador lee e "interpreta", lo que quiero decir es que un programa completamente arbitrario compuesto de n dígitos binarios podría ser resultado de lanzar una moneda n veces (entendiendo que "cara" representa 0 y "cruz" 1, o al revés).

La probabilidad de que ese programa totalmente arbitrario se detenga, a la que he llamado omega (Ω), puede expresarse mediante un número real comprendido entre 0 y 1. (El enunciado $\Omega = 0$ significaría que ningún programa tomado al azar detendría su ejecución, mientras que, $\Omega = 1$, que todo programa aleatoriamente elegido se detendría. En un ordenador de uso general, ninguno de esos dos casos límites resulta factible.) Por ser Ω un número real, la única forma de expresarlo del todo sería mediante una sucesión interminable de dígitos. En base 2, tal secuencia equivaldría a una ristra infinita de ceros y unos.

Tal vez la característica más interesante de Ω resida en que es algorítmicamente aleatorio, esto es, en que no puede comprimirse en un programa (considerado como una secuencia de bits) más breve que él mismo. Esta definición de aleatoriedad, que ocupa un papel central en la teoría de información algorítmica, fue formulada por A.

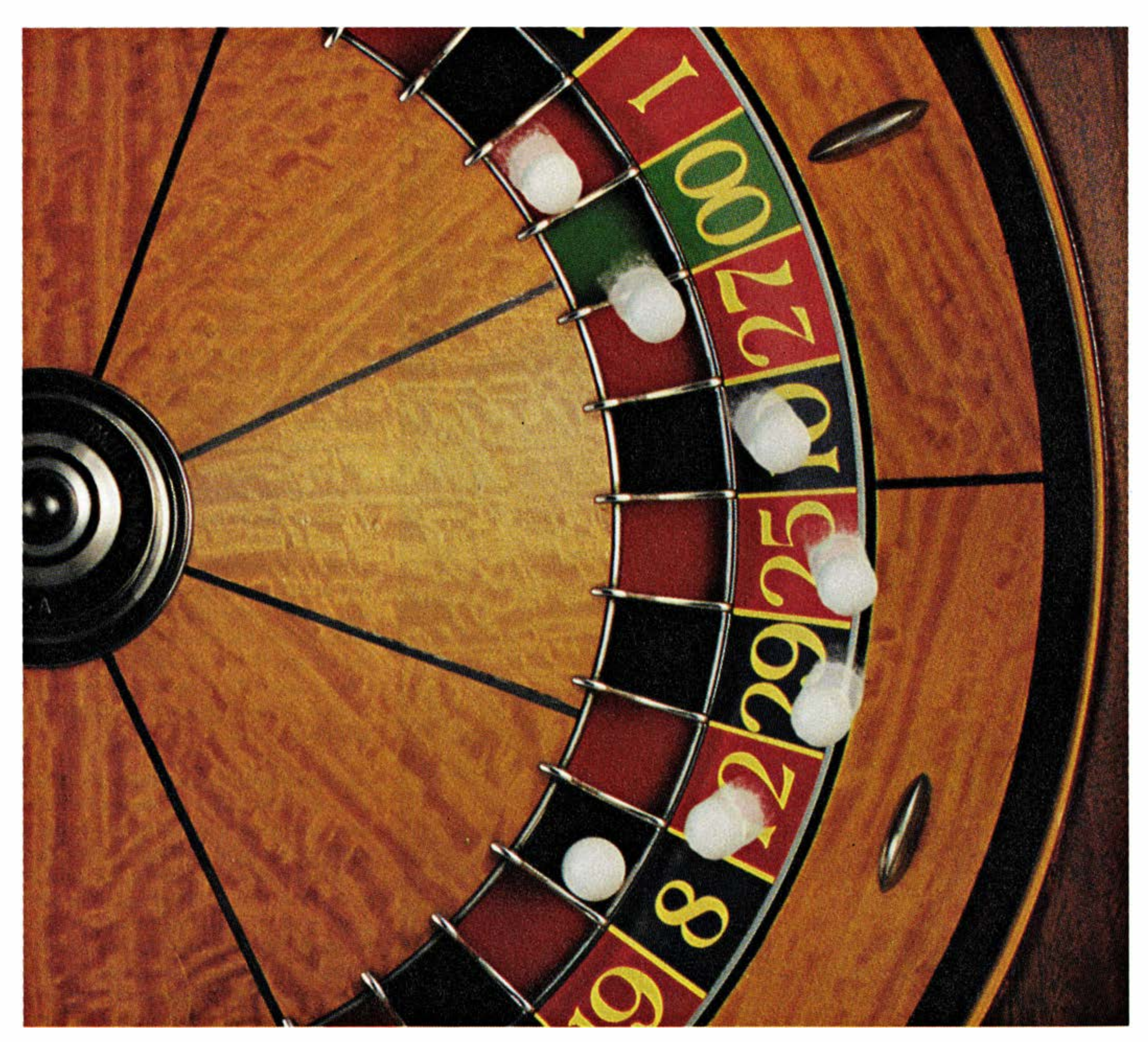
GREGORY J. CHAITIN pertenece a la plantilla del Centro de Investigación Thomas J. Watson que IBM tiene en Yorktown Heights, Nueva York. Es el principal arquitecto de la teoría de información algorítmica. Acaba de publicar dos libros donde aplica conceptos de esa teoría para elucidar la naturaleza de la aleatoriedad y los límites de la propia matemática.

N. Kolmogorov y yo mismo, a mediados de la década de 1960. (Lo hicimos sin previo acuerdo. Posteriormente he debido corregirla).

El concepto que subyace a la definición es sencillo. Ciertas secuencias de bits pueden comprimirse en programas mucho más breves que ellas, porque obedecen a una pauta o regularidad. Por ejemplo, una secuencia de 200 bits de la forma 0101010101... puede comprimirse notablemente describiéndola como "100 repeticiones de 01". Ciertamente, tales secuencias no son aleatorias. Por el contrario, una secuencia de 200 bits generada lanzando al aire una moneda no puede comprimirse, pues, por regla general, la sucesión de ceros y unos resultante no obedecerá a ninguna pauta: se tratará de una secuencia completamente aleatoria.

La mayoría de las secuencias de bits posibles son incompresibles y, por tanto, aleatorias. Dado que una secuencia de bits puede considerarse la representación en base 2 de un número real cualquiera (admitiendo las secuencias infinitas, claro está), la mayoría de los números reales son, de hecho, aleatorios. No cuesta demostrar que un número algorítmicamente aleatorio, como Ω, exhibe las propiedades estadísticas que habitualmente asociamos con la aleatoriedad. Una de tales propiedades es la de normalidad: todos los dígitos posibles se presentan en el número con igual frecuencia. En la representación de base 2, ello significa que, al tender hacia infinito el número de dígitos de Ω, la proporción de 0 y 1 tiende a ser exactamente el 50 por ciento de las cifras de Ω.

Una cuestión técnica de importancia crucial, que debe estipularse con claridad para que Ω tenga sentido, es que los programas considerados han de ser autodelimitantes, es decir, que su longitud total (en bits) tiene que venir dada dentro del propio programa. (Esta cuestión, aparentemente secundaria, paralizó durante casi un decenio todo progreso en este campo y obligó a redefinir la noción de aleatoriedad algorítmica.) Los lenguajes de programación reales son autodelimitantes,



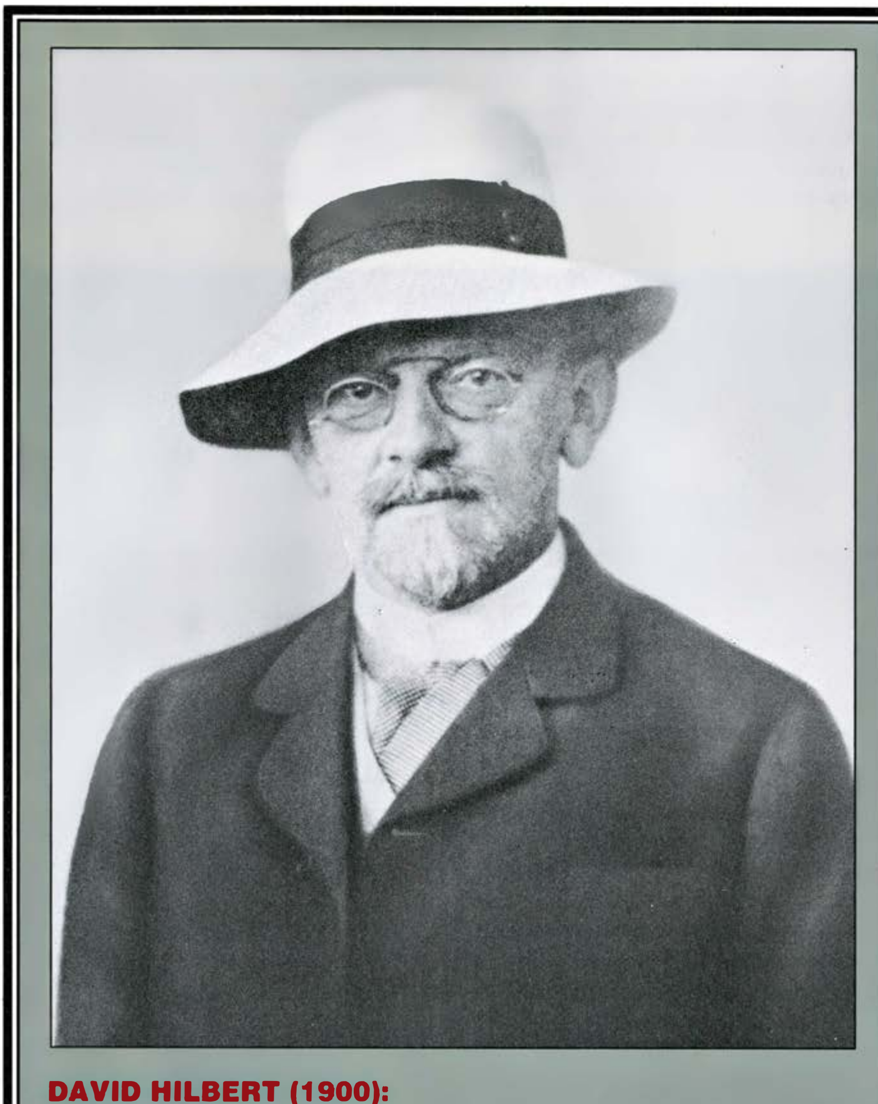
1. LA IMPREDICTIBILIDAD, noción familiar en los casinos, permite a la casa obtener beneficios en los juegos de azar, como el de la ruleta. El autor del artículo sostiene que, igual que los jugadores, es muy posible que los matemáticos hayan de reconciliarse con la idea de que en su ocupación resulta inherente cierta impredictibilidad, que nace de la aleatoriedad de las soluciones de problemas bastante sencillos de la teoría de números, una rama de la matemática pura.

pues proporcionan construcciones para dar comienzo y fin a un programa. Tales construcciones permiten que un programa contenga subprogramas bien definidos, los cuales, a su vez, pueden albergar en su interior otros subprogramas. Dado que los programas autodelimitantes se construyen por concatenación e inclusión de subprogramas autodelimitantes, tales programas sólo alcanzarán la plenitud sintáctica cuando se cierre el último de los subprogramas abiertos. En esencia, las construcciones de comienzo y fin de programas y subprogramas funcionan como la apertura y cierre de paréntesis en las expresiones matemáticas.

De no ser autodelimitantes, resultaría imposible construir programas a partir de subprogramas, y al sumar las probabilidades de detención correspondientes a todos los programas se obtendría un número infinito. Pero si nos limitamos a considerar programas autodelimitantes, no sólo se verifica que Ω queda comprendido entre 0 y 1, sino, también, que puede calcularse explícitamente "en el límite desde abajo". Es decir, resulta posible calcular una sucesión infinita de números racionales (expresables mediante una sucesión finita de bits), cada uno de los cuales se encuentra más cercano al verdadero valor de Ω que el número anterior.

Un procedimiento para obtenerla es calcular sistemáticamente Ω*n* para valores crecientes de *n*; Ω*n* es la probabilidad de que un programa totalmente arbitrario de tamaño menor o igual que *n* bits se detenga dentro de los primeros *n* segundos cuando el programa se ejecuta en un ordenador determinado. Dado que existen 2^k programas de *k* bits de longitud, en principio Ω*n* puede calcularse por el procedimiento de averiguar, para cada valor de *k* comprendido entre 1 y *n*, cuántos de los programas posibles se detienen realmente en el margen de *n* segundos, para lo que se multiplican esos números por 2^{-k} y se suman después todos los productos. Dicho de otro modo, cada programa de *k* bits que se detiene aporta 2^{-k} a Ω*n*; los programas que no se detienen no aportan nada.

Si, por algún método mágico, se nos facilitase el valor de Ω con *k* bits de precisión, podríamos calcular una secuencia de valores de Ω*n* hasta que se alcanzase un valor igual al de Ω que se nos ha proporcionado. En este punto conoceríamos la totalidad de los programas de tamaño menor que *k* bits que se detienen; en esencia, habríamos resuelto el problema de Turing para la totalidad de los programas de tamaño menor que *k* bits. Evidentemente, incluso para valores razonables de *k*, el tiempo requerido por ese cálculo resultaría enorme.



DAVID HILBERT (1900):

"Todo problema definido matemáticamente debe admitir necesariamente solución exacta, ya sea en forma de una auténtica respuesta a la cuestión planteada, ya merced a una demostración de imposibilidad de solución y, con ella, el inevitable fracaso de toda tentativa... Por muy inabordables que tales problemas puedan parecernos, y por muy indefensos que nos encontremos ante ellos, tenemos, empero, la firme convicción de que su solución ha de conseguirse por medio de un número finito de procesos puramente lógicos...

"Oímos en nosotros la perpetua llamada: He ahí un problema. Busca la solución. Puedes hallarla por puro razonamiento..."

2. DECIBILIDAD FUNDAMENTAL de la totalidad de las cuestiones matemáticas; fue causa que abrazó David Hilbert, quien contaba unos 50 años al hacerse esta fotografía. Hilbert estaba convencido de que bastaría un sistema finito de axiomas y reglas de razonamiento para demostrar o infirmar todo teorema.

Al examinar el problema de la detención, hasta ahora me he referido exclusivamente a ordenadores y sus programas; el problema cobró nueva dimensión a la luz de los trabajos de J. P. Jones, de la Universidad de Calgary, y de Y. V. Matijasevič, del Instituto de Matemáticas de Leningrado. El trabajo de ambos ofrece un método para plantear el problema en forma de asertos relativos a ecuaciones diofánticas. Estas ecuaciones, en las que solamente se efectúan multiplicaciones, adiciones y potenciación entera de nú-

meros enteros, reciben su nombre de Diofanto de Alejandría, matemático griego del siglo III d. de C..

En particular, aplicando el método de Jones y Matijasevič podemos identificar la afirmación de que un determinado programa no se detiene con la afirmación de que una determinada familia de ecuaciones diofánticas no posee solución con números enteros. Lo mismo que en la versión primitiva del problema de la detención de ordenadores, resulta fácil comprobar si ciertos números enteros constituyen una solución: basta insertar debidamente los números en las ecuaciones y verificar que los números obtenidos a uno y otro lado del signo igual son iguales. Mucho más difícil es el problema de demostrar que no existe absolutamente ninguna solución, cuando tal es el caso.

La familia de ecuaciones en cuestión se construye a partir de una ecuación básica que contiene una variable particular k, llamada parámetro, que va tomando los valores 1, 2, 3, etcétera [*véase la figura 4*]. Por consiguiente, existe una familia infinitamente grande de ecuaciones (una para cada valor de k), que puede generarse a partir de una ecuación fundamental para cada programa de los que consta una "familia". La afirmación matemática de que la ecuación diofántica de parámetro k carece de solución constituye la forma codificada del aserto "el k-ésimo programa de ordenador no se detiene jamás". Por el contrario, en el caso de que el k-ésimo programa sí se pare, la ecuación correspondiente tendrá exactamente una solución. En cierto sentido, la veracidad o falsedad de afirmaciones de este tipo resulta matemáticamente incierta, pues varía impredictiblemente al ir tomando el parámetro k valores diferentes.

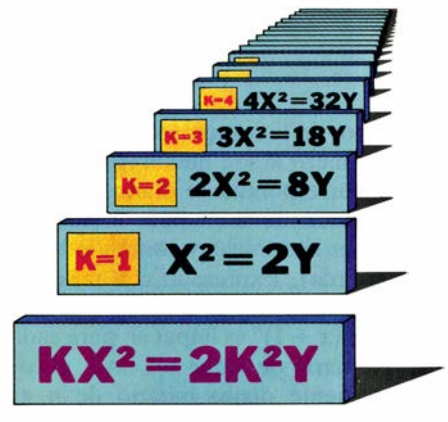
Mi enfoque del problema de la impredictibilidad en matemáticas es similar, pero alcanza un grado de aleatoriedad muy superior. En lugar de "aritmetizar", mediante ecuaciones diofánticas, programas de ordenador que pueden detenerse o no, he aplicado el método de Jones y Matijasevič para aritmetizar un único programa y calcular el k-ésimo dígito binario de Ωn.

El método se funda en una curiosa propiedad de paridad (es decir, relativa a si son pares o nones) de los coeficientes binomiales, que Edouard A. Lucas observó hace ya un siglo, aunque no se ha valorado en su justa medida hasta la fecha. Reciben el nombre de coeficientes binomiales los multiplicandos numéricos de las distintas potencias de x que aparecen al desarrollar expresiones como $(x + 1)^n$. Tales coeficientes se computan sin dificultad construyendo el llamado triángulo de Pascal (más conocido en España por triángulo de Tartaglia) [*véase la figura 5*].

El teorema de Lucas afirma que el coeficiente de x^k en el desarrollo de $(x + 1)^n$ es impar, si y sólo si todos los dígitos de la representación en base 2 del número k son menores o iguales que el correspondiente dígito de la representación de n en base 2 (comenzando por la derecha y contando hacia la izquierda). Expresado con más claridad: el coeficiente de x^k en un desarrollo de $(x + 1)^k$ es impar si, para cada dígito binario de k que sea un 1, el correspondiente dígito binario de n es



3. LA INDECIBILIDAD FUNDAMENTAL de las cuestiones matemáticas fue demostrada con el teorema de la incompletitud por Kurt Gödel, a quien vemos aquí cuando rondaba la cincuentena, en fotografía de ©Arnold Newman. Gödel publicó su demostración en 1931, cuando él contaba 25 años y, Hilbert, 70.



4. FAMILIA de ecuaciones generable asignando enteros al parámetro K de una ecuación fundamental.

también un 1; en caso contrario, el coeficiente es par. Por ejemplo, el coeficiente de x^2 en el desarrollo $(x + 1)^4$ es 6, que es par. Así, el 1 de la representación binaria de 2 (que es 10) no se corresponde con otro 1 en su misma posición en la representación binaria de 4 (que es 100).

Aunque en teoría la aritmetización resulta sencilla y elegante, programarla nada tiene de trivial. Pese a ello, me pareció entretenido abordarla. Preparé al efecto un programa "compilador" que generaba ecuaciones a partir de programas de una máquina de registros, un ordenador formado por un pequeño número de registros capaces de albergar números arbitrariamente grandes. Se trata, como es obvio, de una abstracción, pues los registros de cualquier ordenador real tendrán necesariamente una capacidad limitada.

Al introducir en un ordenador real, programado con el compilador, un programa de máquina de registros que ejecuta instrucciones en el lenguaje de programación LISP, se obtiene, en pocos minutos, una ecuación de unas 200 páginas de longitud que contiene alrededor de 17.000 variables enteras no negativas. Puedo entonces deducir una ecuación diofántica que contenga un parámetro k que codifique el k-ésimo dígito binario de Ωn sin más que introducir en la larguísima ecuación de 200 páginas un programa en LISP (traducido a forma binaria) que calcule el k-ésimo bit de Ωn. Para todo par dado de valores de k y de n, la ecuación diofántica tiene exactamente una solución si el k-ésimo bit de Ωn es un 1 y carece de solución si es un 0.

Siendo válido lo anterior para cualquier par de valores de k y de n, en principio podría mantenerse fijo k e incrementarse sistemáticamente sin límite el valor de n, e ir calculando el valor de Ωn para cada valor de n. Para valores pequeños de n, el k-ésimo bit de Ωn oscilará erráticamente entre 0 y 1. No obstante, al final acabará fijándose en un 0 o en un 1, dado que, para valores muy grandes de n, habrá de ser igual al k-ésimo bit de Ω, que es inmutable. Por consiguiente, la ecuación diofántica admite infinitas soluciones para un valor de su parámetro k en el caso de que el k-ésimo bit de Ω resulte ser un 1 y, por razones análogas, tiene solamente un número finito de soluciones si el k-ésimo bit de Ω resulta ser un 0. De este modo, en vez de estudiar si una ecuación diofántica posee soluciones para cada valor de su parámetro k, lo que indago es si tiene una infinidad de soluciones.

Aunque parezca poco lo que se gana preguntándose si existe una infinidad de soluciones en lugar de preguntarse si existen soluciones, en realidad hay una diferencia crítica: las respuestas a mi pregunta poseen independencia lógica. Dos asertos matemáticos son lógicamente independientes cuando resulta imposible deducir uno del otro, es decir, cuando ninguno de ellos es consecuencia lógica del otro. De ordinario, esta noción de independencia se distingue de la utilizada en estadística. En ésta, se dice que dos sucesos fortuitos son independientes cuando el resultado de uno de ellos no tiene peso ni influencia en el resultado del otro. Por dar un ejemplo: el resultado de lanzar una moneda no influye en el resultado del lanzamiento siguiente. Los resultados son estadísticamente independientes.

Intervienenen en mi análisis las dos nociones de independencia. La respuesta correspondiente a mi pregunta para un valor bien determinado de k es lógicamente independiente de la respuesta para otro valor de k. Ello es debido a que los bits de Ω, que son los que determinan las respuestas, son estadísticamente independientes.

Resulta fácil demostrar que, para más o menos la mitad de los valores de k, el número de soluciones es finito, y que para la otra mitad el número de soluciones es infinito, pero no hay forma posible de comprimir las respuestas en una fórmula o un sistema de reglas; la situación remeda los lanzamientos de una moneda. Dado que Ω es algorítmicamente aleatorio, ni siquiera el conocimiento de las respuestas para los 1000 primeros valores de k nos sería de ayuda a la hora de obtener la respuesta correcta para otro valor de k. Un matemático no gozaría de ninguna ventaja sobre un apostador que lanzara una moneda a la hora de decidir si una ecuación determinada admite un número finito o infinito de soluciones. Cualesquiera axiomas y demostraciones que pudiéramos aplicar para hallar la respuesta correspondiente a la ecuación diofántica con un valor dado de k resultarían inaplicables para la misma ecuación con otro valor de k.

El razonamiento matemático resulta, pues, esencialmente inútil en este caso, ya que no existe relación entre las ecuaciones diofánticas generadas así. Por muy brillantes que seamos, por muy largas que resulten las demostraciones y muy complejos los axiomas matemáticos, al crecer k, la serie de proposiciones que enuncian si el número de soluciones de las ecuaciones diofánticas es finito o infinito nos vencerá rápidamente. La aleatoriedad, la incertidumbre y la impredictibilidad se dan incluso en las ramas elementales de la teoría de números que tratan de las ecuaciones diofánticas.

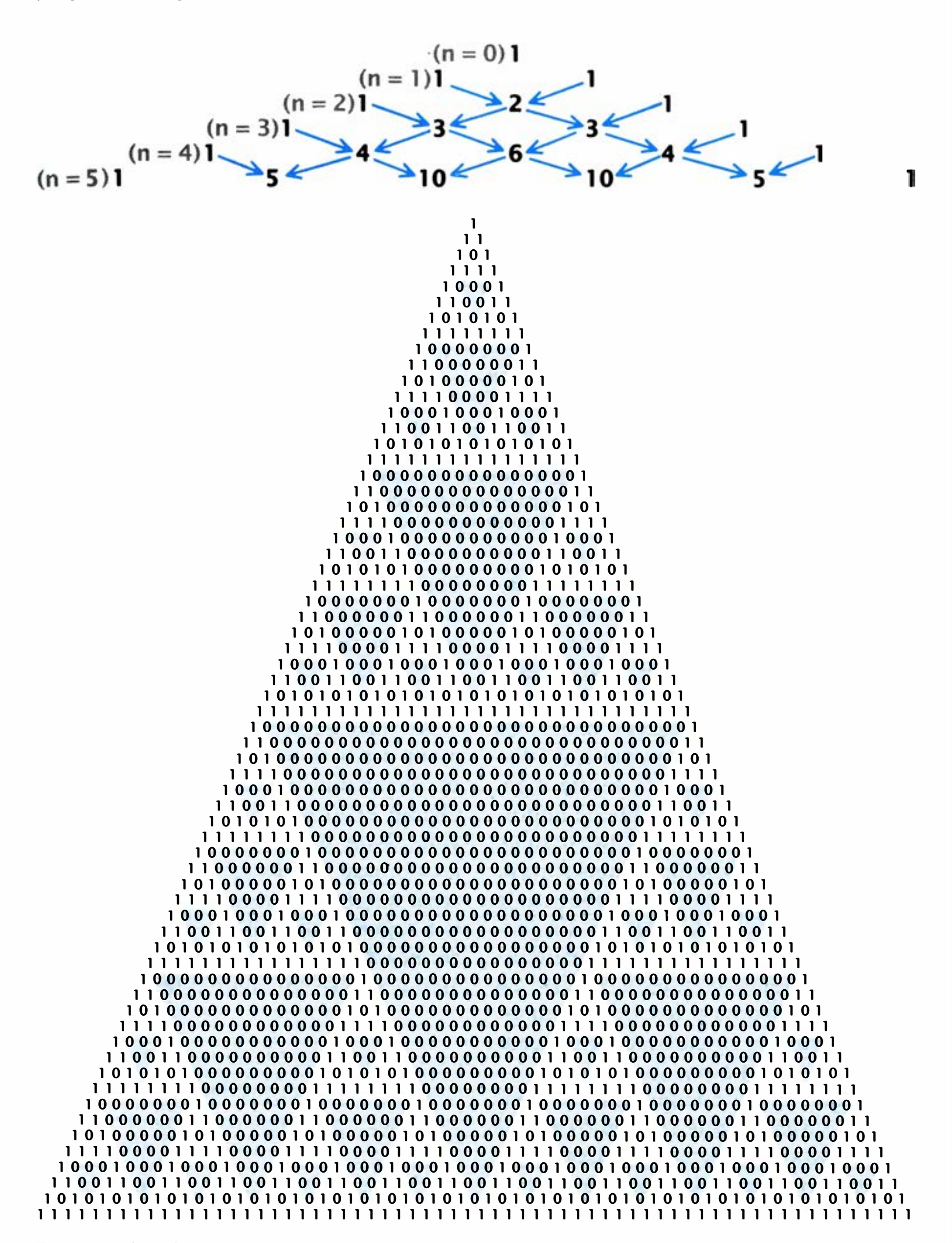
¿De qué modo han afectado a las matemáticas el teorema de incompletitud de Gödel, el problema de la detención de Turing y mi propio trabajo? El hecho cierto es que la mayoría de los matemáticos se han encogido de hombros y dejado de lado esos resultados. Como es obvio, están de acuerdo con la afirmación de que cualquier conjunto de axiomas es incompleto, pero en la práctica prescinden de tal hecho, por entender que no afecta directamente a su trabajo. Desdichadamente, sin embargo, puede que en ocasiones sí les afecte. Aunque el teorema original de Gödel sólo parecía aplicable a insólitas proposiciones matemáticas de escaso interés práctico, la teoría algorítmica de la información ha demostrado que la incompletitud y la aleatoridad son naturales y lo invaden todo. Ello me hace pensar que quizá debería tomarse más en serio la búsqueda de nuevos axiomas aplicables a la descripción de los números enteros.

En efecto, el hecho de que muchos problemas matemáticos hayan permanecido sin solución durante siglos e incluso milenios tiende a respaldar mi tesis. Los matemáticos dan por supuesto que el fracaso en la resolución de tales problemas les es exclusivamente imputable a ellos; mas, ¿no podría ser que tal fracaso se debiera a la incompletitud de sus axiomas? Por ejemplo, desde la Grecia clásica, la cuestión de la existencia de números perfectos impares ha desafiado todos los intentos de darle respuesta. (Números perfectos son los que resultan exactamente iguales a la suma de todos sus divisores, de los que se excluye el propio número. Así, por ejemplo, el número 6 es perfecto, pues 6 es igual a 1 más 2 más 3.) ¿Cabe en lo posible que el enunciado "No existen números perfectos impares" sea indemostrable? En tal caso, tal vez fuera

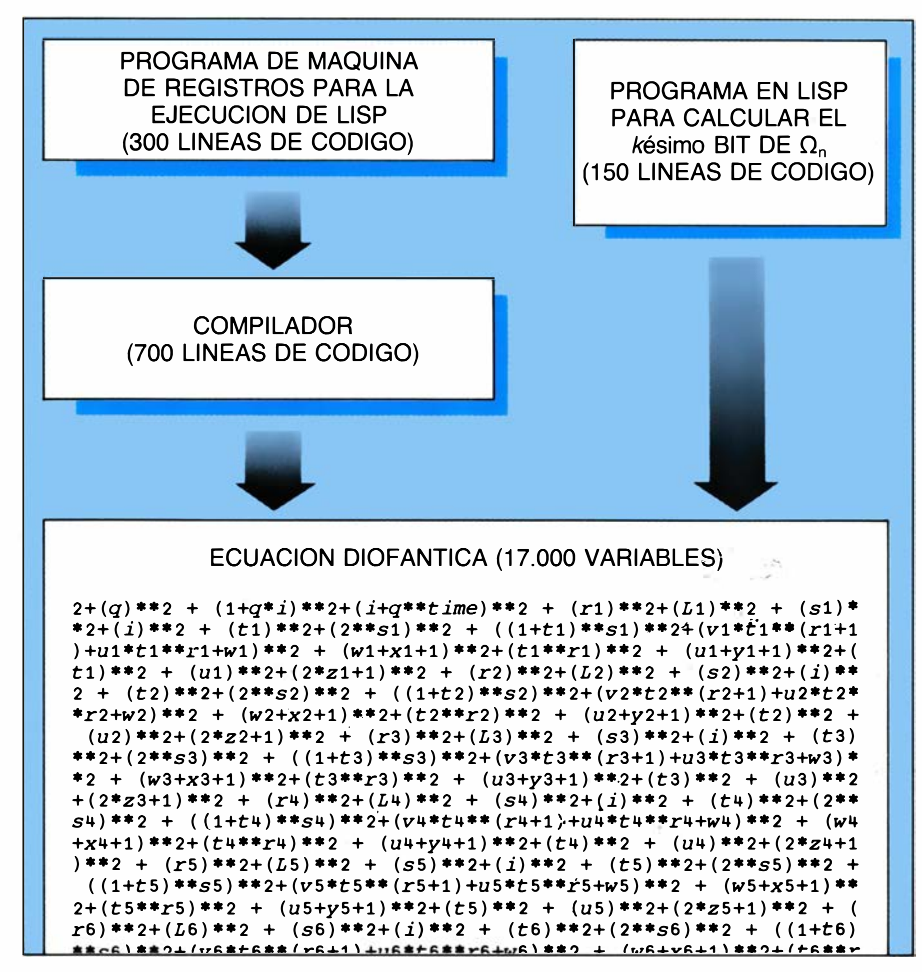
preferible que los matemáticos lo aceptaran como axioma.

Semejante sugerencia parecerá absurda a muchos matemáticos, pero quizá no tanto a un físico o a un biólogo. Para quienes trabajan en ciencias empíricas, el criterio clave a la hora de juzgar si una hipótesis debe o no considerse el fundamento de una teoría es su utilidad, y no necesariamente que sea una "verdad evidente". Cuando invocando una hipótesis se zanjan muchas conjeturas, las ciencias experimentales no la dejan de lado. (La inexistencia de números perfectos impares no parece tener consecuencias graves y, por consiguiente, no resultaría un axioma útil a la luz del criterio recién explicado.)

Lo cierto es que en algunos casos los matemáticos han fundado su trabajo en conjeturas útiles indemostradas. Así, pese a no haberse demostrado nunca, suele aceptarse como verdadera la llamada hipótesis de Riemann, pues muchos otros teoremas importantes se fundan en ella. Es más, la hipótesis se ha comprobado empíricamente con auxilio de los ordenadores más poderosos, no habiéndose encontrado jamás un solo contraejemplo. En efecto, los programas de ordenador (que, como ya he indicado, equivalen a enunciados matemáticos) también se comprueban de este modo: se someten a prueba en



5. TRIANGULO DE PASCAL (*arriba*), uno de los métodos que permiten calcular los coeficientes del desarrollo de expresiones de la forma $(x + 1)^n$. Se parte de un triángulo de 1; los valores de cada fila sucesiva se calculan sumando los pares de números adyacentes y colocando sendos 1 en los extremos de la nueva fila. **sarrollo de expresiones de la forma $(x + 1)^n$. Se parte de un triángulo de 1; los valores de cada fila sucesiva** **convertirse en una llamativa configuración fractal remplanzando los coeficientes impares por unos y, los pares, por ceros (*abajo*). La configuración exhibe gráficamente una propiedad de los coeficientes que se aprovecha en la aritmetización y la conversión de programas de ordenador en ecuaciones algebraicas.**



6. ARITMETIZACION de Ω. Se consigue sustituyendo una incógnita de la ecuación deducida a partir de un programa general, por la representación binaria de un programa específico destinado a calcular el *k*-ésimo dígito de Ω_n (expresado en base 2). Ω_n constituye una aproximación de "*n*-ésimo" orden de Ω, que es la probabilidad de que un ordenador detenga su funcionamiento cuando los bits que constituyen el programa que debe ejecutar se determinan aleatoriamente, por ejemplo, lanzado una moneda al aire.

una serie de casos, y no mediante demostración matemática rigurosa.

¿Habrá otros problemas, en otros campos de la ciencia, que saquen provecho de la comprensión más profunda que ofrecen esos hallazgos sobre los fundamentos de las matemáticas? Estoy convencido de que la teoría algorítmica de la información puede importar a la biología. Los genes que regulan el desarrollo embrionario constituyen, en efecto, un programa informático de construcción de un organismo. Es concebible que la "complejidad" de ese ordenador bioquímico pueda medirse en términos similares a los que he desarrollado para la cuantificación del contenido de información de Ω.

Aunque Ω sea completamente aleatorio (o infinitamente complejo) y nunca pueda computarse con exactitud, puede aproximarse con precisión arbitraria en una cantidad de tiempo infinita. Creo que podría lograrse una aproximación a la complejidad de los organismos vivos operando de modo similar. Una sucesión de Ωn que tiende hacia Ω puede considerarse una metáfora de la evolución, que tal vez contenga el germen de un modelo matemático de la evolución de la complejidad biológica.

Al final de su vida, John von Neumann lanzó a los matemáticos el reto de hallar una teoría abstracta que explicase el origen y la evolución de la vida. Este problema fundamental, lo mismo que los restantes problemas de igual naturaleza, resulta de una dificultad superlativa. Tal vez la teoría algorítmica de la información contribuya en algo a sugerir un camino de avance.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ALGORITHMIC INFORMATION THEORY. Gregory J. Chaitin. Cambridge University Press, 1987.

INFORMATION, RANDOMNESS & INCOMPLETENESS. Gregory J. Chaitin. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1987.

THE ULTIMATE IN UNDECIDABILITY. Ian Stewart en *Nature*, vol. 232, n.º 6160, págs. 115-116; 10 de marzo de 1988.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Condensadores

Son los guardianes electrónicos de los circuitos integrados. Los modernos procesos de producción, los materiales utilizados y los nuevos diseños han posibilitado que ese dispositivo bicentenario conviva con la técnica del silicio

Donald M. Trotter, Jr.

La pastilla de silicio –el "chip"– es el corazón de la electrónica moderna. Mas, para que los circuitos integrados operen correctamente, necesitan la ayuda de un componente algo pasado de moda: los condensadores. Se comportan éstos como receptores eléctricos, desviando las señales eléctricas espúreas y almacenando los excesos de carga que podrían dañar los circuitos y alterar su funcionamiento. Aunque su precio es muy bajo, los condensadores son la base de una industria multinacional que mueve miles de millones de dólares. Forman parte también de los televisores y las radios, de las calculadoras y los ordenadores, y, en general, de todos los dispositivos que alojan circuitos integrados.

Los principios del diseño de los condensadores se introdujeron hace casi 250 años con la invención de la botella de Leyden. Estos principios no han cambiado sustancialmente, pero los avances en los materiales y las técnicas de producción han permitido aumentar el rendimiento de los condensadores de forma espectacular. La carga que se podía almacenar en una botella de Leyden de un cuarto de litro en el siglo XVIII cabe hoy en un dispositivo de tamaño no mucho mayor que la cabeza de un alfiler. La verdad es que, a lo largo de estos últimos 30 años, el tamaño de los condensadores se ha reducido de forma análoga a como lo ha hecho la tecnología de los circuitos ("chips").

La miniaturización es una prioridad fundamental en la industria de los condensadores, pues las ventajas que ofrecen los circuitos integrados de muy pequeño tamaño no se pueden materializar a menos que el tamaño de los condensadores se reduzca también de forma análoga. Los dos diseños más populares de los condensadores son otras tantas maravillas de la ingeniería: uno de ellos se basa en el uso de capas de materiales cerámicos con espesores inferiores a la milésima de centímetro; el otro es capaz de condensar la superficie de una hoja de periódico en un dispositivo cuyo tamaño es similar al de un grano de azúcar. Con el fin de comprender las bases teóricas de tales diseños, conviene echar una ojeada a los orígenes de los condensadores.

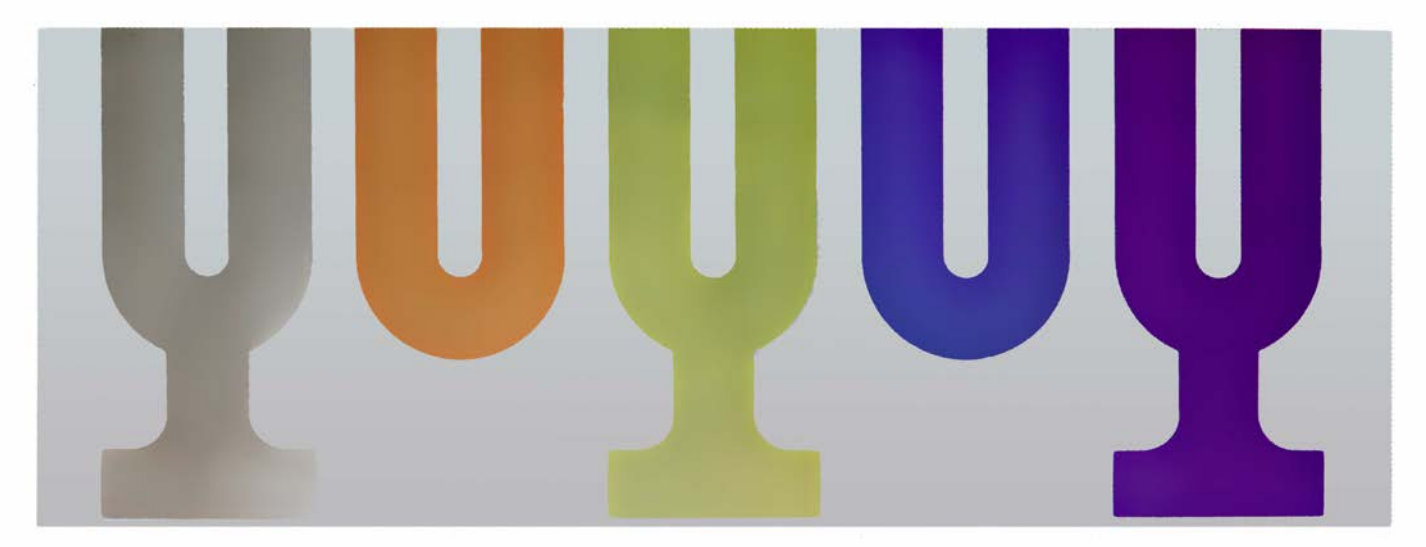
Los primeros condensadores, las botellas de Leyden mencionadas, fueron perfeccionados en 1746 por el físico y astrónomo inglés John Bevis. La botella de Leyden consiste en un recipiente corriente de vidrio cuyas superficies interior y exterior están recubiertas por sendas láminas metálicas [*véase la figura 4*]. Una barra metálica atraviesa el tapón de caucho que cierra la botella y hace contacto con la lámina de recubrimiento interna. Ambas láminas, interna y externa, pueden actuar como electrodos, pero no poseen otra carga eléctrica que la suministrada por una fuente exterior.

La fuente de carga puede ser una batería, un generador o simplemente una barra de caucho frotada con una piel. Cuando la barra de caucho, que es portadora de electrones móviles, entra en contacto con la barra metálica de la botella de Leyden, los electrones pasan libremente desde dicha barra hacia el interior de la botella. En consecuencia, el electrodo interior queda cargado negativamente. Dado que la capacidad de almacenamiento de la botella viene limitada por la repulsión mutua entre los electrones, llega un momento en que se detiene el flujo de los electrones. Un principio similar a éste se pone de manifiesto en relación con el almacenamiento de una carga positiva, originada por la extracción de electrones del electrodo interior. La facultad de almacenamiento de cargas eléctricas en un dispositivo recibe el nombre de capacidad.

La capacidad de una botella de Leyden aumenta con la presencia de un segundo electrodo en su exterior. Cuando este electrodo se une a tierra, la carga almacenada en el electrodo interior atrae una carga igual y de signo opuesto procedente de la tierra. Por ser ilimitada en la práctica la posibilidad de suministro de cargas opuestas por parte de la tierra, dicho suministro puede ser tan grande como haga falta. A medida que esta carga se va depositando en el recubrimiento exterior de la botella, va atrayendo nuevos electrones hacia el recubrimiento del interior, eliminando en parte las fuerzas repulsivas que se oponían a su llegada. En virtud de ese proceso, la capacidad de la botella aumenta.

Pero no se trata de una capacidad ilimitada; el equilibrio entre las fuerzas atractivas y repulsivas se inclina siempre hacia la repulsión, debido a que las fuerzas repulsivas se ponen de manifiesto a distancias menores de la fuente de electrones, en razón de la existencia del aislante de vidrio. En consecuencia, a medida que se van añadiendo cargas adicionales al electrodo interior, el efecto neutralizador de la tierra se va reduciendo paulatinamente y termina por desaparecer. Al llegar a este punto

DONALD M. TROTTER, JR., trabaja en la empresa Corning Glass Works, en la que lleva varios años investigando los condensadores experimentales. Comenzó su formación superior en la Universidad estatal de Kansas, recibiéndose de doctor en la tejana de Austin. En 1980 entró en Corning tras un período de investigación postdoctoral en la Universidad de Cornell. Trotter es un entusiasta de la ciencia ficción y ha publicado algunos relatos cortos en este género.



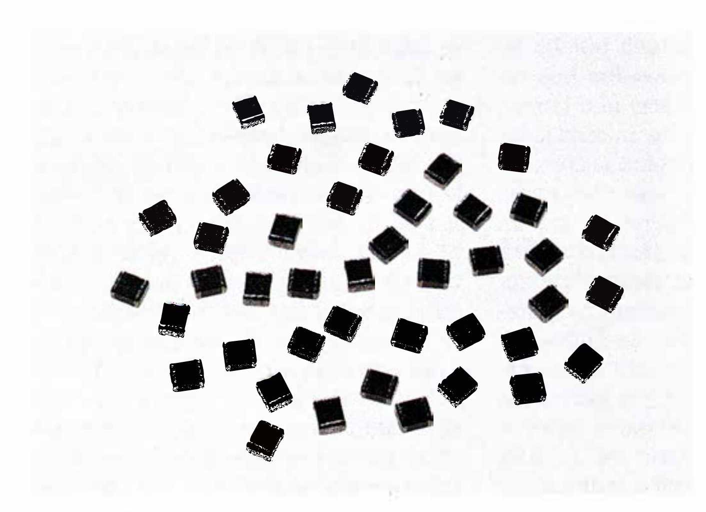
1. ESTE AISLANTE EXPERIMENTAL para condensadores está fabricado con un óxido del metal niobio. El metal puro (*izquierda*) aparece junto a otras muestras cuyas superficies se han oxidado. La capa de óxido es tan delgada que produce efectos de interferencias en la luz reflejada; en consecuencia, las capas de óxido más delgadas aparecen de color púrpura, azul y verde, en tanto que las capas más gruesas adquieren una coloración roja y anaranjada. Aunque el óxido de niobio constituye un aislante excelente, puede resultar inadecuado debido a que su superficie cristaliza cuando le aplicamos una diferencia de potencial.

ya no se puede almacenar más carga en la botella.

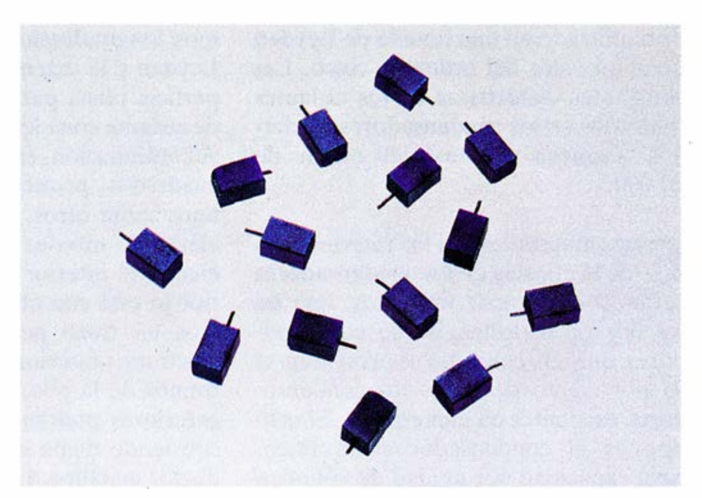
Existen dos formas evidentes de aumentar la capacidad de una botella de Leyden. Consiste la primera en aumentar la superficie de los electrodos, proporcionando más espacio para las cargas y amortiguando así la repulsión entre los electrones. La otra forma consiste en disminuir el espesor del vidrio que separa las cargas almacenadas en el interior de las cargas de neutralización externas. (Ahora bien, si el vidrio es excesivamente delgado, los electrones pueden atravesarlo, produciéndose una chispa que elimina la carga.) Aunque estas dos formas son difíciles de llevar a la práctica en una botella de Leyden, ambas constituyen dos de las tres estrategias clásicas utilizadas por los científicos e ingenieros para mejorar el funcionamiento de los condensadores modernos.

El comportamiento eléctrico de los electrones en el material aislante ofrece una tercera forma de aumentar la capacidad. Aunque los electrones del aislante no son móviles, se pueden desplazar ligeramente bajo la influencia de las fuerzas atractivas y repulsivas originadas por los electrodos de cada lado. Los electrones situados cerca de una de las caras del aislante se acumulan junto a su superficie, creando así una zona cargada negativamente. En el otro lado, los electrones se alejan de la superficie; ello da lugar a la aparición de una carga positiva.

Las cargas originadas en el aislante en virtud de estos procesos ayudan a neutralizar las cargas de los electrodos. Algunos aislantes son capaces de contener tantas cargas como los propios electrodos. La neutralización reduce las fuerzas repulsivas y permite aumentar la carga de los electrodos, con lo cual aumenta la capacidad. La importancia de este fenómeno se refleja en la constante dieléctrica, una propiedad del aislante. La constante dieléctrica de



2. CONDENSADORES CERAMICOS DE CAPA MULTIPLE, conocidos normalmente con las siglas CCCM: son de muy pequeño tamaño. Las protuberancias plateadas que se observan en cada extremo son los terminales; el color moreno que se aprecia entre ellos corresponde a un aislante cerámico basado en el titanato de bario. Los condensadores de capa múltiple suelen recubrirse con un material plástico antes de unirlos a la placa de un circuito, en el que se utilizan para controlar sobrecargas de potencia y señales eléctricas espúreas.



3. LOS LINGOTES DE TANTALO son un elemento intermedio en la fabricación de los condensadores de tántalo. Los lingotes metálicos se recubren con capas de óxido de tántalo que, al igual que sucede con las capas de óxido de niobio observadas en la fotografía de la parte superior, reflejan diferentes colores en función de su espesor. Las capas de color azul son más gruesas que las que presentan coloración púrpura. Los condensadores de tántalo y los condensadores cerámicos de capa múltiple constituyen los tipos principales de condensadores.



4. LA BOTELLA DE LEYDEN ilustra los principios en que se basa el funcionamiento de los condensadores. La botella está recubierta con sendas láminas metálicas o electrodos, tanto en el interior (*rojo*) como en el exterior (*azul*). Una barra metálica que atraviesa el tapón de caucho de la botella hace contacto con el electrodo interior. Una fuente externa suministra una carga eléctrica en forma de electrones (*signos menos*). La carga se almacena en el electrodo interior gracias a las cargas positivas depositadas en el electrodo exterior (*izquierda*). Cuando el electrodo exterior se conecta a tierra, se dispone de una cantidad mayor de cargas de neutralización (*botella de la derecha*) y se pueden almacenar más electrones en el electrodo interior.

un material indica cuánto aumenta la capacidad de un dispositivo al colocar aquél entre los electrodos en lugar del vacío. La constante dieléctrica del vidrio utilizado en una botella de Leyden tiene un valor del orden de cinco. Las constantes dieléctricas de los aislantes utilizados en los condensadores modernos alcanzan valores del orden de 20.000.

Estos materiales son los responsables de la eficacia de los condensadores cerámicos de capas múltiples, uno de los dos tipos ordinarios de condensadores que en conjunto representan el 95 por ciento de todos los condensadores existentes en el mercado. El otro tipo es el condensador electrolítico, cuya capacidad por unidad de volumen resulta ser todavía más elevada. Estas dos clases de condensadores se basan en estrategias diferentes, encaminadas a potenciar su rendimiento. Su método de fabricación difiere tanto como su diseño.

Los condensadores cerámicos de capas múltiples (CCCM) son una versión compacta de la botella de Leyden [*véase la figura 5*]. Supongamos que cortamos longitudinalmente una botella de Leyden y la extendemos sobre una superficie plana para formar una lámina de aislante con electrodos en cada lado. A continuación, esta lámina se corta en cuadrados pequeños, que apilamos, unos sobre otros, de suerte tal que un electrodo interior esté unido con otro electrodo interior y un electrodo exterior lo esté con otro exterior. Si quitamos un trozo pequeño de todos los electrodos interiores en uno de los extremos de la pila, todos los electrodos exteriores podrían conectarse entre sí cubriendo dicho extremo con un conductor metálico. De forma análoga, todos los electrodos interiores se podrían conectar entre sí quitando un pequeño trozo de los electrodos exteriores y empleando otro conductor metálico. Como resultado de esta disposición, cada terminal uniría muchos electrodos para formar en realidad un único electrodo de gran tamaño.

Aunque los CCCM no se construyen así, su diseño se basa en tal disposición. En el método de fabricación real se emplea, como aislante, una mezcla de titanato de bario y pequeñas cantidades de otros óxidos. Estos materiales cerámicos tienen constantes dieléctricas entre 2000 y 6000; se presentan en forma de polvo cuyas partículas tienen un tamaño del orden de algunos micrometros. (El micrometro es la millonésima parte del metro.) Estas partículas se encuentran dispersas en un disolvente especial, formando una pasta cuya consistencia es similar a la de una pintura.

Se extiende la pasta en capas delgadas sobre una cinta de papel o de acero inoxidable. El espesor de las capas se controla mediante una hoja metálica, situada a una altura de algunas milésimas de centímetro sobre la cinta. La pasta se seca cuando el disolvente se evapora; se forma entonces una cinta compacta suave y flexible como un tejido. A continuación, se corta dicha cinta en láminas, en forma de cuadrados de quince a veinte centímetros de lado; en cada lámina se depositan miles de electrodos a través de una pantalla fina. Los electrodos se fabrican con una aleación formada por partículas de plata y paladio dispersas en un medio orgánico.

Una vez impresos los electrodos, se comprime un total de 30 a 60 láminas con electrodos entre varias láminas sin electrodos para formar una pila. Esta pila se secciona para obtener miles de condensadores sueltos. Los electrodos se imprimen en direcciones contrarias en las capas sucesivas, de modo que, cuando estas capas se apilan y seccionan, los electrodos existentes sobre capas alternas quedan a ambos lados de la pila. Estos condensadores se calientan en un horno a temperaturas comprendidas entre 1000 y 1400 grados Celsius. Calentamiento que provoca que las partículas individuales del material cerámico y de los electrones se unan entre sí (pero sin llegar a fundir) y formen estructuras compactas. Una vez calentadas, las capas cerámicas crean una textura finamente granular y cohesionada, quebradiza y fuerte. Las partículas metálicas de los electrodos se unen también durante la fase de calentamiento y forman unas láminas metálicas continuas.

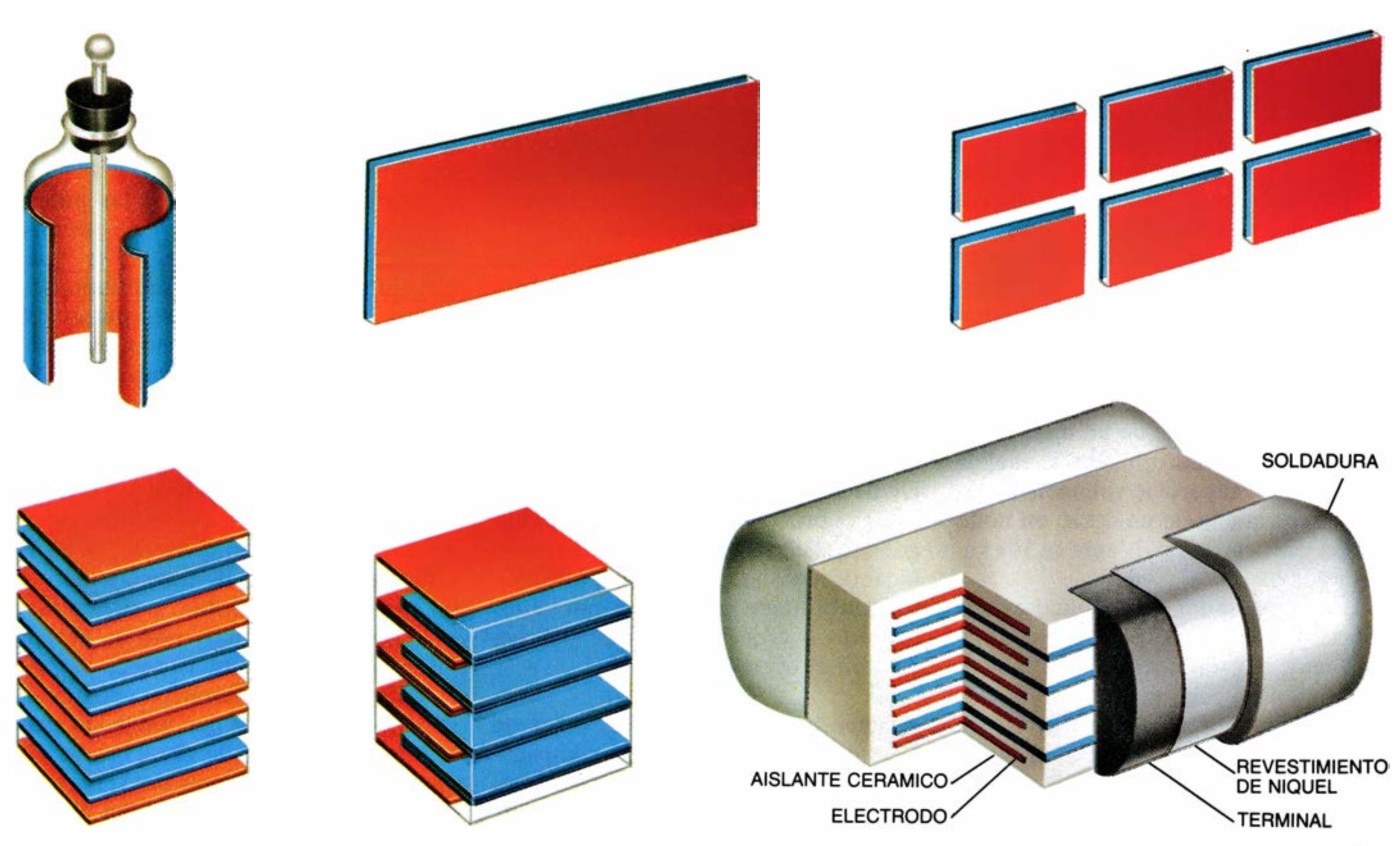
Los terminales se aplican sumergiendo los extremos de cada condensador

en otra dispersión de plata y paladio, con el fin de adherirlos a la superficie del material cerámico. Esta dispersión funde gracias a un nuevo proceso de calentamiento. Los terminales son revestidos a continuación con un baño de níquel para proteger la plata. La unión posterior de los terminales a un circuito se facilita con la unión de unos cables metálicos. Los CCCM se someten con frecuencia a un acabado consistente en un recubrimiento plástico que los protege contra la humedad.

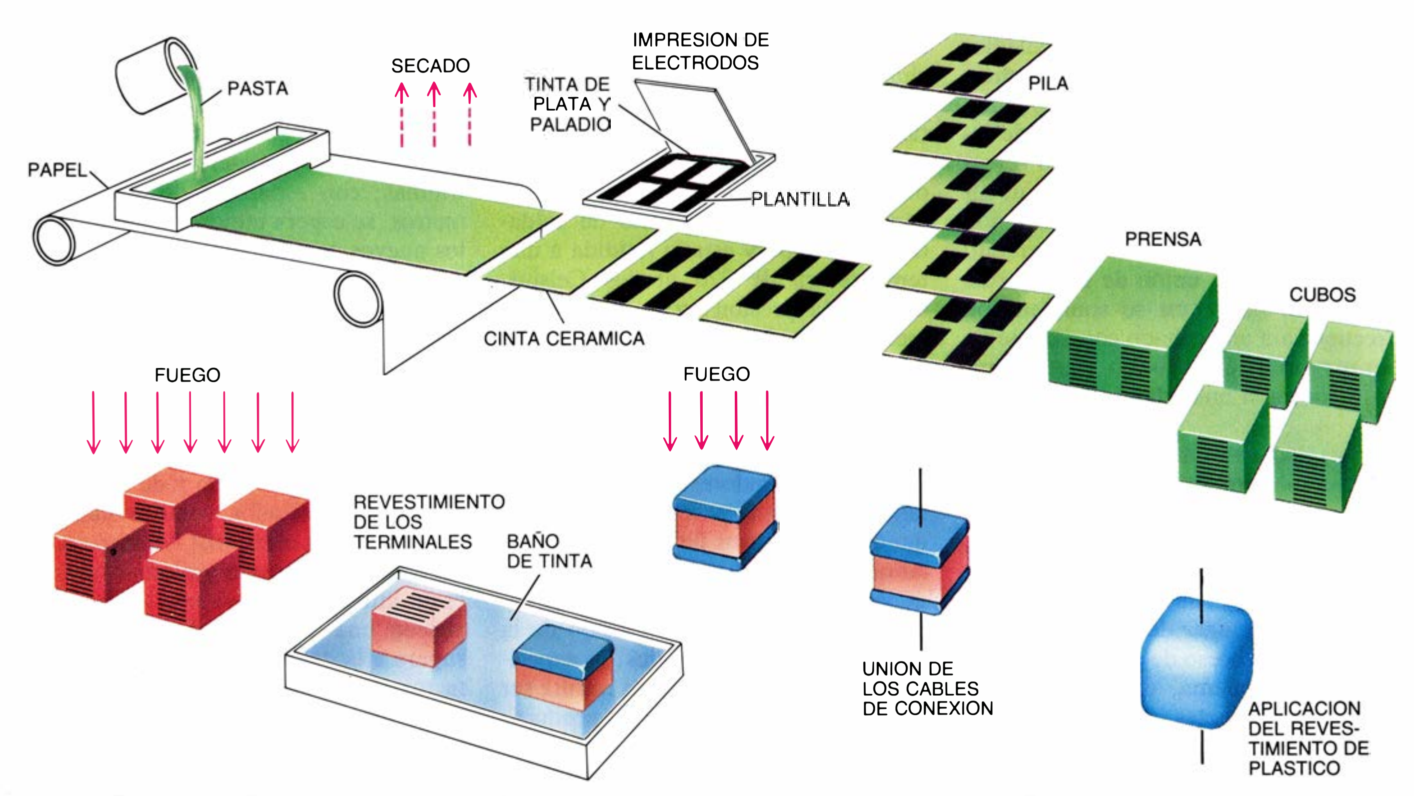
Una ligera variante de todo este proceso permite fabricar condensadores provistos de electrodos de plomo y estaño. Los electrodos se imprimen, sobre la cinta cerámica, mediante una pasta que contiene carbono y polvos cerámicos en lugar de plata y paladio. Durante el proceso de calentamiento el carbono se quema, dejando espacios vacíos con soportes ocasionales de cerámica en los lugares ocupados anteriormente por los electrodos. Es el momento de introducir en el dispositivo unos terminales porosos especiales, sumergiendo los extremos de los condensadores en una dispersión de plata con un agente espumante. Una vez concluida esta fase, los dispositivos se someten a un segundo proceso de calentamiento. Los electrodos se implantan en los lugares vacíos, eliminando el aire de los terminales y sumergiendo los condensadores en un baño de soldadura de plomo y estaño fundida a una temperatura de 320 grados Celsius. Cuando la presión en la cámara aumenta hasta alcanzar un valor de decenas de kilogramos por centímetro cuadrado, la soldadura se ve forzada a penetrar a través de los terminales porosos hasta llegar a los electrodos.

Los condensadores de plomo y estaño son algo más seguros y baratos que los dispositivos de plata y paladio. Ahora bien, debido al espesor mayor de las capas de material cerámico, necesario para soportar la presión de la inyección de los electrodos, la capacidad por unidad de volumen resulta ser menor. En cualquier caso, el producto final es un condensador con un tamaño comprendido entre los tres y seis centímetros, constituido por una serie de capas de material cerámico con un espesor de 20 a 40 micrometros. El espesor de los electrodos viene a resultar de uno a cinco micrometros. La superficie total de uno de estos dispositivos alcanza los 100 centímetros cuadrados por centímetro cúbico. Gracias al empleo de capas de material cerámico ultrafinas, con espesores de 10 micrometros, se espera mejorar esta cifra en los nuevos condensadores.

A pesar de la gran superficie de los electrodos y el pequeño espesor de las capas de aislante de los CCCM, la principal razón de su elevada capacidad por unidad de volumen reside en el altísimo valor de las constantes dieléctricas del titanato de bario y de los otros materiales utilizados como aislantes. Los materiales cerámicos basados en el niobiato de magnesio y plomo, que se están introduciendo ya en el mercado, poseen una constante dieléctrica que supera a la del titanato de bario en un factor del orden de dos o tres, manteniendo al mismo tiempo la estabilidad térmica del material cerámico ordinario. De este modo, la tradición de mejorar las propiedades de los dieléctricos utilizados en los condensadores cerámicos de capas múltiples se mantiene plenamente vigente.



5. DISEÑO DE LOS CCCM; se basa en la botella de Leyden. Si esta botella se cortara lateralmente, se extendiera sobre una superficie plana, se cortara a trozos y se apilara de forma tal que un electrodo interior estuviera en contacto con otro electrodo interior (*rojo*) y un electrodo exterior estuviera en contacto con otro electrodo exterior (*azul*), la botella original se habría convertido en una serie de capas alternas de vidrio y de electrodo. Las capas de electrodos se podrían unir mediante dos conductores diferentes quitando unos trozos de todos los electrodos interiores en uno de los extremos de la pila y de todos los electrodos exteriores en el otro extremo, y conectando cada uno de estos conjuntos a sendos terminales. Esta estructura se pone de manifiesto en una sección transversal de un CCCM (*abajo, derecha*): una suerte de "sandwich" de material cerámico y electrodos cuyos terminales se hallan recubiertos con una capa de níquel.



6. FABRICACION DE CCCM dotados de capas de aislante cuyo espesor es menor que una milésima de centímetro. La manufactura comienza partiendo de un polvo cerámico (fundamentalmente titanato de bario) mezclado con un disolvente y un producto cohesionador. Esta pasta se extiende y se seca para dar lugar a una lámina cerámica, que a continuación se corta en hojas cuadradas con unas dimensiones del orden de 15 a 20 centímetros de lado. Sobre estas láminas se imprimen miles de electrodos constituidos por una mezcla de plata y paladio. Los electrodos se disponen de forma tal que sobresalen por los extremos de las láminas alternas. Las láminas se apilan en grupos de 30 a 60 y a continuación se someten a un calentamiento a temperaturas comprendidas entre los 1000 y 1400 grados Celsius. Los extremos se sumergen en un baño de una disolución de plata y paladio y los terminales se calientan a una temperatura inferior. Finalmente, a estos terminales se les unen unos conductores metálicos y el condensador se recubre con un material plástico. (Dibujos de George Kelvin.)

En contraste con ello, el valor de la constante dieléctrica de las capas de aislante de los condensadores electrolíticos varía entre 8 y 27; a pesar de lo cual, a igualdad de volumen, las capacidades de estos dispositivos son mayores que las de los condensadores cerámicos. Los condensadores electrolíticos deben sus propiedades a una combinación de superficies extraordinariamente grandes y espesores de las capas de aislante extremadamente pequeños. Un condensador electrolítico típico ofrece una superficie de un metro cuadrado por centímetro cúbico, lo cual da una relación superficie/volumen 10 veces mayor que la de un CCCM, en tanto que el espesor de su aislante es 100 veces menor.

Un condensador electrolítico es una especie de botella de Leyden con el vidrio muy delgado, arrugada hasta convertirla en un cubo muy pequeño. Estos condensadores se construyen con lingotes de un metal poroso en un 60 por ciento. La mayoría de los condensadores electrolíticos modernos están fabricados a partir de tántalo pulverizado, un metal duro de color gris. El polvo de tántalo se comprime hasta formar un lingote; a continuación, este lingote se calienta al vacío hasta temperaturas próximas a los 2000 grados Celsius durante varias horas, lo cual da lugar a que las partículas de tántalo se traben fuertemente entre sí. Las grietas y los rincones del polvo aumentan el área superficial del lingote, que servirá luego como electrodo del condensador.

La forma más fácil de aplicar una capa aislante continua a los contornos irregulares de un electrodo de tántalo consiste sencillamente en alterar la superficie del metal para que pierda su carácter conductor. Esto se consigue oxidando la superficie del lingote para formar una capa de óxido de tántalo. De hecho, esta capa se formaría ya durante el proceso de fabricación del lingote, si el tántalo se calentara al aire en lugar de al vacío, pero la capa resultante sería bastante granulosa y, por tanto, tendería a ceder cargas que podrían destruir el dispositivo.

Como proceso alternativo, se puede formar un aislante liso y compacto mediante un proceso de anodización. El lingote de tántalo se hace servir como ánodo de una célula electrolítica, sumergiéndolo en una disolución diluida y conductora de un ácido o base, junto con un segundo electrodo; a continuación se conecta a ambos una batería. El circuito se configura de suerte que se extraigan electrones del electrodo de tántalo y se depositen en el otro electrodo. La disolución conductora completa el circuito.

La disolución penetra en los poros del lingote de tántalo y se pone en contacto con toda su superficie. A medida que los electrones se van retirando del lingote, éste atrae los iones presentes en la disolución que contienen oxígeno y que están cargados negativamente. Iones que se combinan con el metal y rinden óxido de tántalo. El espesor de la capa oxidada aumenta hasta alcanzar un valor límite entre 1/10 y 1/5 de micrometro. Esta capa es transparente; sin embargo, debido a que su espesor óptico es del orden de media longitud de onda de la luz visible, proporciona al lingote un color muy vivo en virtud de la producción de interferencias [*véase la figura 3*]. La coloración resultante depende del espesor que tenga la capa y, por consiguiente, la observación de dicho color permite controlar si la capa de óxido de tántalo aislante ha alcanzado el espesor deseado.

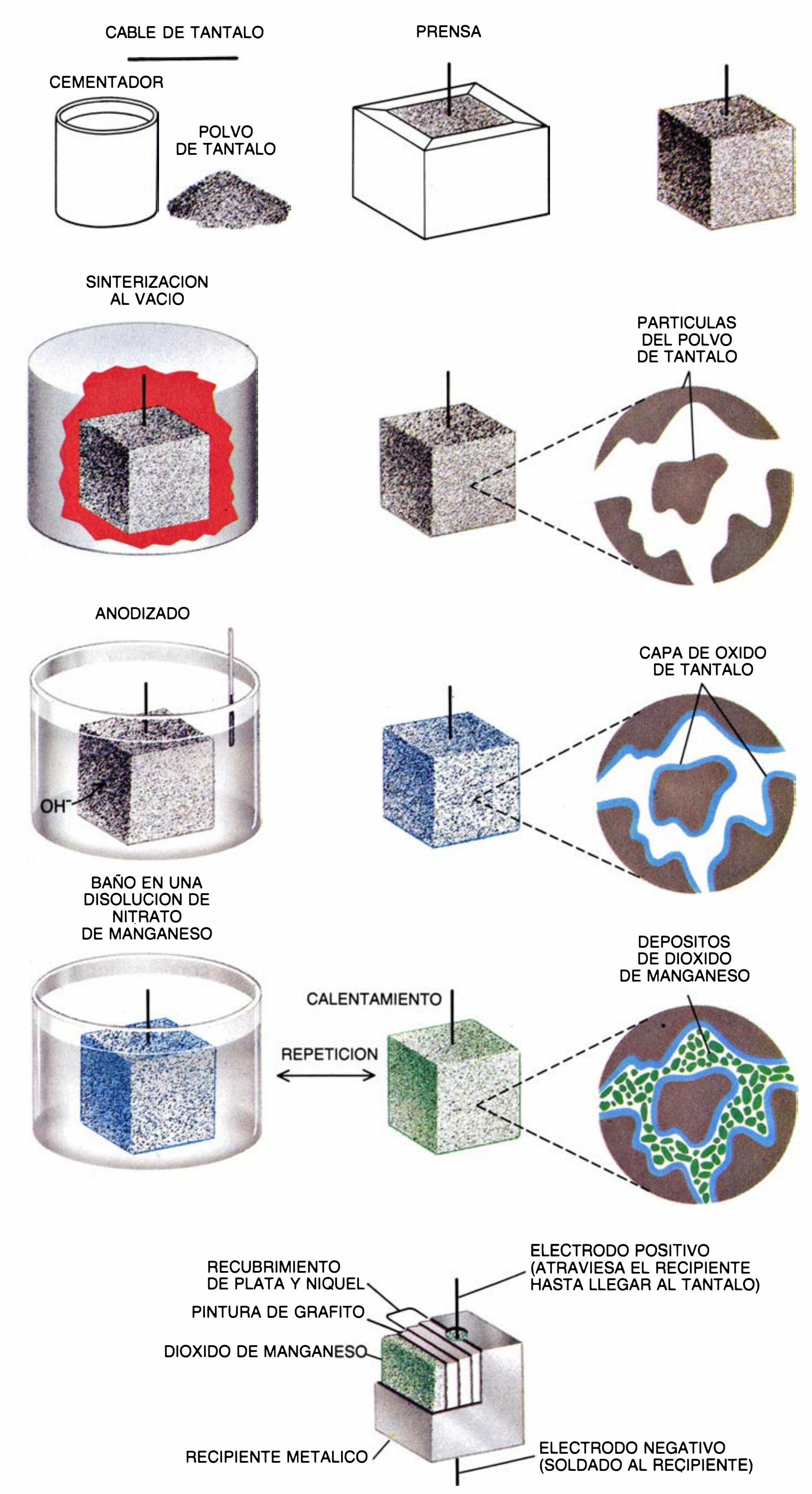
La siguiente fase del proceso de preparación consiste en recubrir el aislante con un material que pueda actuar de segundo electrodo. En las primeras in-

vestigaciones al respecto se llenaban los poros del lingote con un líquido conductor, pero los condensadores con electrodos líquidos, difíciles de sellar, resultaban vulnerables al proceso de congelación.

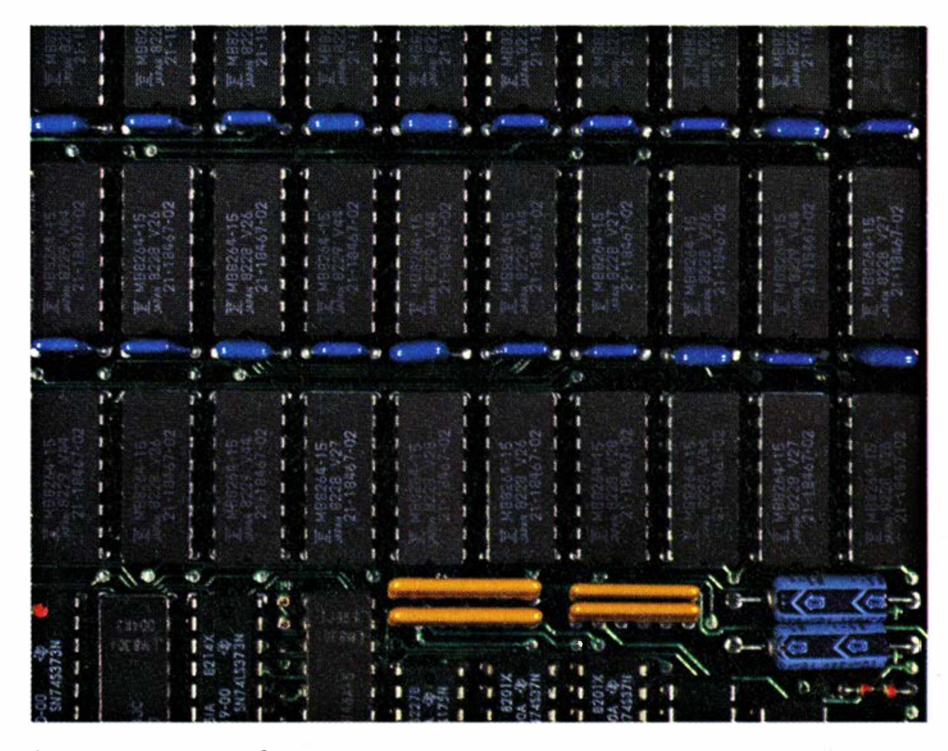
En 1956, la compañía Bell Telephone inventó la técnica que se suele utilizar hoy en la fabricación de condensadores de tántalo. De acuerdo con la misma, se empapa el lingote anodizado en una disolución concentrada de nitrato de manganeso, un líquido de color rosa pálido. Cuando el lingote se calienta posteriormente a 300 grados Celsius, el agua presente en la disolución absorbida se evapora y el nitrato de manganeso se descompone, dejando unos depósitos de dióxido de manganeso en el interior del lingote. El proceso se reitera varias veces hasta que la capa de dióxido de manganeso alcanza el espesor necesario.

El dióxido de manganeso aunque es un material cerámico, conduce la electricidad lo suficientemente bien como para servir de segundo electrodo en un condensador electrolítico. Posee, además, otra propiedad interesante: proporciona al condensador la cualidad de poder cicatrizar por sí mismo en el caso de que se produzca una rotura en la capa aislante de óxido de tántalo. Este fallo provocaría que los electrones se escaparan a través de la barrera existente entre los electrodos. Si la rotura es pequeña, el calor originado por el flujo de electrones puede elevar la temperatura en sus proximidades y degradar el dióxido de manganeso, liberando oxígeno y un óxido de manganeso inferior. El oxígeno libre reacciona con el tántalo expuesto para formar más óxido de tántalo, reparando así la grieta producida en el aislante. Por otra parte, el óxido de manganeso inferior que se forma en las proximidades de la rotura no constituye un buen conductor y, en consecuencia, su presencia contribuye a aislar la grieta producida del resto del electrodo.

Acabada la preparación de las capas de aislante y electrodo, se procede a empaquetar el condensador electrolítico. El lingote se recubre de níquel y se pinta con grafito y plata para proteger y suavizar sus contornos frágiles e irregulares. Por último, se encierra en un recipiente metálico. Gracias a un conductor conectado a este recipiente se establece un contacto con el electrodo de dióxido de manganeso por medio de las capas de níquel, grafito y plata; otro conductor incorporado al lingote se co-



7. FABRICACION DE CONDENSADORES DE TANTALO: se inicia a partir de un lingote poroso fabricado mediante polvo de tántalo y un cohesionador. El lingote se somete a un proceso de cocción para unir las partículas metálicas y a continuación se anodiza con el fin de obtener una película aislante de óxido de tántalo. Más tarde, el lingote se sumerge en una disolución de nitrato de manganeso y se calienta, formándose depósitos de dióxido de manganeso semiconductor en sus poros. El dióxido de manganeso es uno de los electrodos y el tántalo sobre el que está depositado el otro. El condensador se recubre luego con una pintura de grafito, otra de plata y otra de níquel; finalmente, se encapsula en un recipiente adecuado.



8. LA UNIDAD DE MEMORIA incorpora las dos clases principales de condensadores. Los rectángulos de color castaño oscuro son conjuntos de circuitos integrados (''chips''); en el extremo de cada uno de estos conjuntos los CCCM revestidos de plástico azul brillante proporcionan vías de diversión para las señales eléctricas espúreas. Los dispositivos de color azul que se observan en una esquina son los condensadores de tántalo que amortiguan las fluctuaciones en la potencia suministrada a los componentes del equipo.

necta al electrodo de tántalo. El condensador está ya listo para ser conectado a un circuito.

A pesar de su mayor capacidad por unidad de volumen, los dispositivos electrolíticos no son de aplicación polivalente. Así, la polaridad de la carga almacenada en un condensador electrolítico no se puede invertir. Mientras los electrodos de un condensador cerámico de capa múltiple pueden almacenar cargas de cualquier polaridad, en los condensadores electrolíticos la carga positiva se debe almacenar siempre en el electrodo metálico, puesto que ésta es la polaridad en la que se anodizó el electrodo en cuestión. En virtud de esa inflexibilidad, los condensadores electrolíticos se suelen utilizar solamente con corriente continua, en tanto que los CCCM funcionan también con corriente alterna. Por otro lado, los condensadores electrolíticos están más sujetos al salto de chispas que los condensadores cerámicos, por la sencilla razón de que sus capas de aislantes son mucho más delgadas. Por tanto, en las aplicaciones relacionadas con voltajes relativamente elevados conviene recurrir a los CCCM.

Los dos tipos de condensadores difieren también en otros aspectos, relativos a sus respuestas eléctricas; el diseñador de circuitos debe tenerlos en cuenta. Ello no obstante, ambas clases de condensadores constituyen ejemplos espectaculares de la forma elegante en que se han combinado los materiales y los procesos de preparación para conseguir un elevado nivel de miniaturización en un dispositivo que, en última instancia, todavía sigue siendo una botella de Leyden. Acuciados por las demandas de la industria de los circuitos integrados, los fabricantes de condensadores están obligados a mejorar todavía más las constantes dieléctricas, reducir los espesores de los aislantes utilizados y aumentar las superficies de los electrodos. Es muy posible que las innovaciones del mañana conviertan los condensadores actuales en objetos arcaicos, como lo es hoy la botella de Leyden.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DIELECTRIC MATERIALS AND APPLICATIONS. Dirigido por Arthur R. von Hippel. John Wiley & Sons, Inc., 1954.

DIELECTRICS AND WAVES. Arthur R. von Hippel. John Wiley & Sons, Inc., 1954.

PRINCIPLES AND APPLICATIONS OF FERROELECTRIC AND RELATED MATERIALS. Malcom E. Lines y Alastair M. Glass. Oxford University Press, 1977.

DEVELOPMENTS IN ELECTROLYTIC CAPACITORS. Walter J. Bernard en *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 124, n.° 12, pág. 403C-409C; Diciembre, 1977.

Cómo enfoca el ojo humano

A medida que envejecemos, disminuye nuestra capacidad para enfocar los objetos cercanos. Se han identificado varias causas probables de ello: cambios bioquímicos y de la geometría del cristalino, entre otras

Jane F. Koretz y George H. Handelman

Le sucede a casi todo el mundo: hacia los 45 años de edad hay que usar gafas para poder leer. ¿Cómo enfoca el ojo joven y sano los objetos cercanos? ¿Por qué disminuye la visión de cerca? Durante mucho tiempo no hemos tenido respuesta para la primera pregunta; y la segunda constituye aún tema de debate. Hemos abordado ambos problemas mediante estudios fotográficos del cristalino y simulación matemática. Y hemos demostrado que concurren diversos procesos, que limitan progresivamente la capacidad de enfocar los objetos cercanos; otros procesos neutralizan algún tiempo la decadencia, pero acaban cediendo, por regla general hacia la quinta década de la vida.

Cuando miramos un objeto, la luz que refleja atraviesa la córnea (una capa transparente que recubre el frente del ojo) y el humor acuoso, pasa por la pupila del iris y va al cristalino, que en circunstancias normales es transparente y cuya forma y orientación resultan análogas a la lente de una cámara fotográfica. De ahí, la luz viaja a través del gelimorfo humor vítreo hasta la retina: la parte del ojo que convierte la luz en señales eléctricas que se envían al cerebro, donde se interpretan.

Para enfocar una imagen, la luz debe enviarse de tal modo que los rayos converjan en la fóvea, el centro de la retina. Cuanto más cerca del ojo se encuentre un objeto, más debe desviarse la luz para verlo con claridad. La córnea, el humor acuoso y el humor vítreo poseen, todos ellos, un poder de refracción (capacidad de desviar la luz) constante; el cristalino puede acomodarse: puede acentuar la curvatura de sus superficies anterior y posterior, aumentando de ese modo su capacidad de enfoque.

JANE F. KORETZ y GEORGE H. HANDELMAN trabajan en el Instituto Politécnico Rensselaer. Koretz, doctor en biofísica por la Universidad de Chicago, enseña allí biología. Handelman ocupa la cátedra Amos Eaton de Rensselaer. Doctorado en matemática aplicada por la Universidad Brown, dirigió su departamento de exactas y fue decano de la facultad de ciencias de Rensselaer durante 18 años. Los autores quieren dedicar este artículo a la memoria de Henry N. Fukui, del Instituto National estadounidense del Ojo.

¿Cómo se acomoda el cristalino? A mediados del siglo XIX, el físico alemán Hermann von Helmholtz postuló, en su *Tratado de óptica fisiológica*, una explicación global que nuestros trabajos, y los de otros, han confirmado en sus rasgos generales. Helmholtz advirtió que el cristalino se encontraba suspendido de unos filamentos que se proyectaban del músculo ciliar, que rodeaba el ecuador del cristalino a modo de collar, aunque no establecía contacto directo con él. Según se sabe ahora, esos filamentos, o zónulas de Zinn, configuran alrededor del cristalino tres anillos de "rayos" filiformes; un anillo se une por el ecuador y, los otros dos, algo por delante y por detrás suyo.

Helmholtz propuso que, cuando el ojo enfoca el infinito (en el ser humano empieza a unos seis metros de distancia), el músculo ciliar, que es un esfínter, se encuentra relajado y, por ello, expandido; el diámetro de ese músculo circular alcanza entonces su máximo. Conforme se expande el músculo, tensa las zónulas, lo que a su vez modifica el cristalino. Tal estiramiento estrecha la parte anterior y posterior del cristalino e incrementa el diámetro de su ecuador. En esta situación —denominada estado no acomodado— la capacidad del cristalino para desviar la luz es mínima. La suma de las refracciones producidas en la córnea, el humor acuoso, el cristalino y el humor vítreo desacomodados permite apenas enfocar en la fóvea la imagen de los objetos alejados.

Cuando el ojo intenta enfocar un punto situado a menos de seis metros, el músculo ciliar se contrae: se reduce el diámetro de su luz y se registra un ligero movimiento del músculo hacia delante. Ambos cambios reducen la tensión de las zónulas y relajan la tensión que éstas ejercen sobre el cristalino. En consecuencia, el cristalino experimenta una recuperación elástica: igual que se expanden las pelotas de esponja al dejar de comprimirlas, el cristalino rebota y alcanza un estado más relajado todavía. Conforme el cristalino enfoca objetos progresivamente más cercanos, se engruesa de delante atrás, se acentúa la curvatura de sus superficies y disminuye el diámetro del ecuador. El proceso de relajación está sometido a un control riguroso, que permite alcanzar el grado exacto de incremento de la refracción necesario para enfocar objetos situados a menos de seis metros.

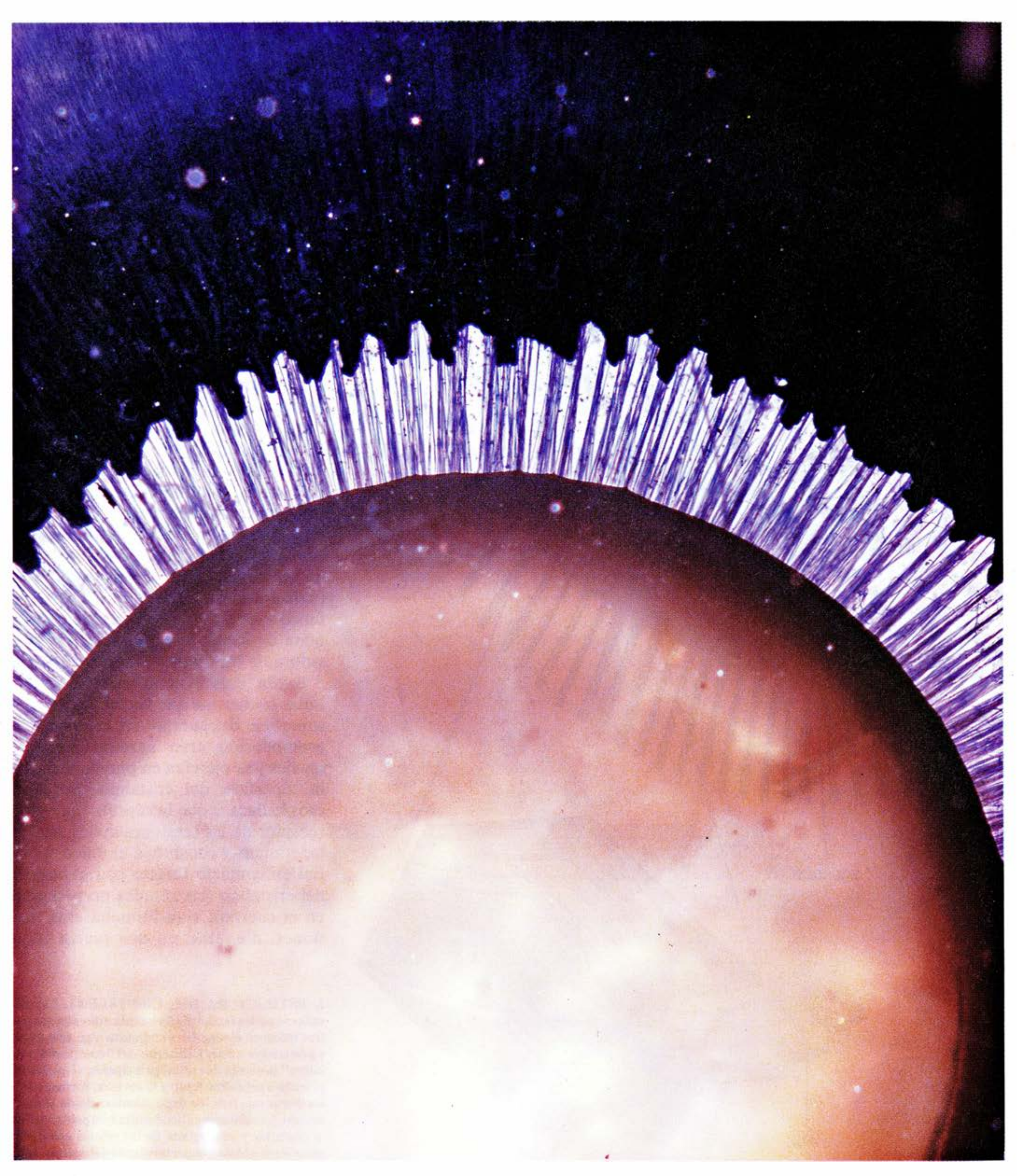
El cristalino se encuentra, pues, desacomodado —más plano y menos refractor— cuando está sometido a la máxima tensión: si el ojo enfoca el infinito y el músculo ciliar se halla totalmente relajado. El cristalino alcanza la máxima acomodación —la mayor curvatura y capacidad de refracción— cuando está sometido a la mínima tensión: si el ojo enfoca el objeto visible más cercano y el músculo ciliar se halla totalmente contraído.

El modelo de Helmholtz goza hoy de aceptación general, pero deja muchas cuestiones abiertas. Por ejemplo, ¿en qué medida afectan a la forma del cristalino los cambios pequeños de la pauta de tensiones ejercida por las zónulas? ¿Cuánto debe relajarse la fuerza ejercida por las zónulas para que la curvatura del cristalino permita leer y en qué ángulo deben reunirse las zónulas y el cristalino? ¿Participa también en la acomodación el humor vítreo, al que Helmholtz concedió poca importancia?

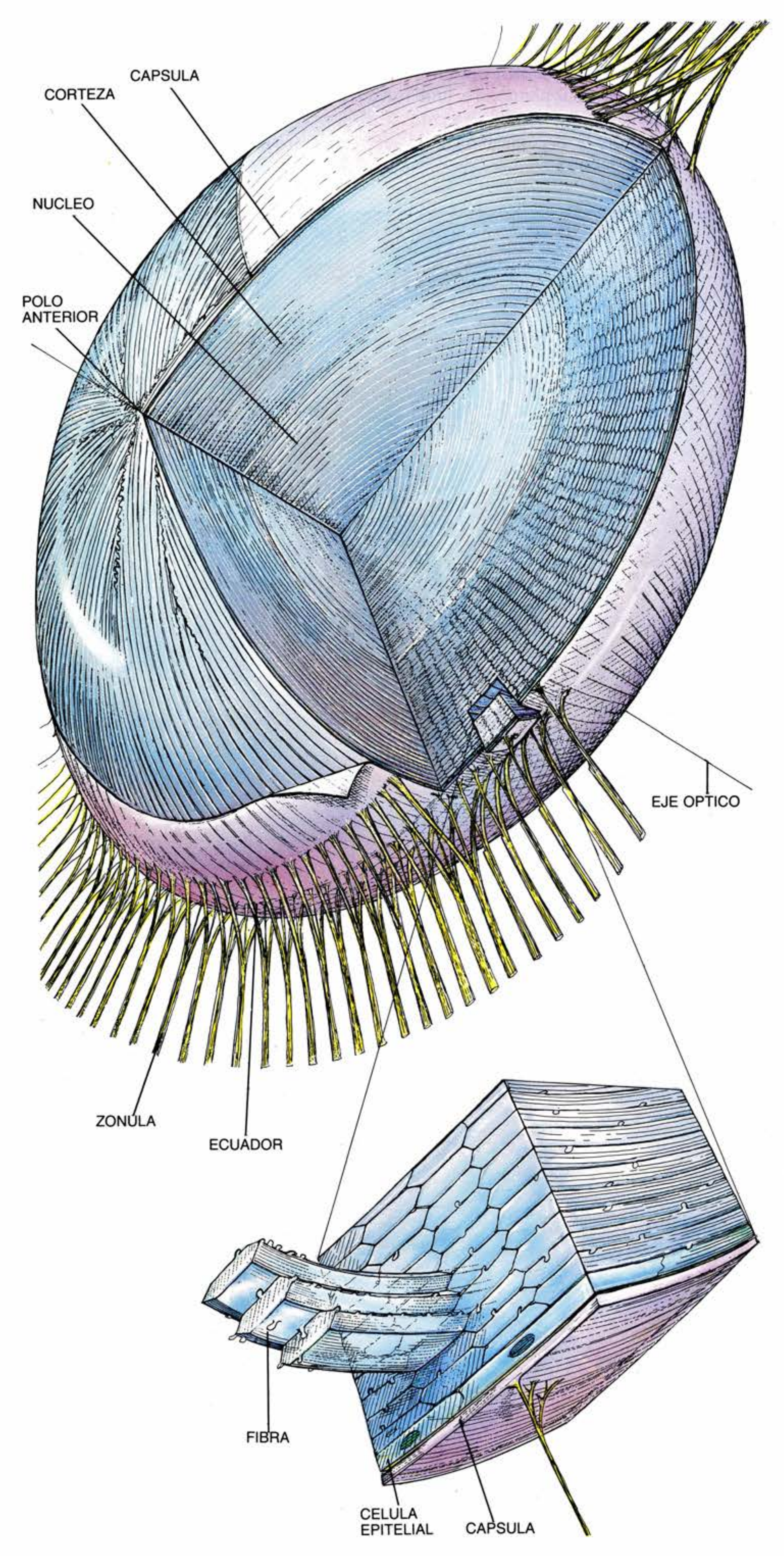
Helmholtz concibió el cristalino

como una bolsa de fluido fácilmente deformable. La verdad es que esa "bolsa" consta de fibras largas, que se encajan y se superponen como los catafilos de la cebolla. La bolsa propiamente dicha, la cápsula del cristalino, está formada por fibras de naturaleza diferente, orientadas en paralelo a la superficie del cristalino. Ambos tipos de fibras resisten el estiramiento, pero no la flexión. Y obligan a plantearse una nueva cuestión: ¿en qué medida afecta a la acomodación la organización estructural del cristalino?

Quien pretenda responder a tales cuestiones debería, en teoría, examinar directamente las zónulas y el humor vítreo del ojo vivo, midiendo la magnitud y dirección de las fuerzas que aquellos ejercen sobre la cápsula y el cuerpo del cristalino. Para determinar el efecto de



1. CRISTALINO DEL OJO HUMANO, que está suspendido del músculo ciliar, un anillo de tejido concéntrico con el cristalino, por las zónulas de Zinn, unos filamentos (*"hilillos" púrpura*). En esta perspectiva frontal de la lente ocular no aparece el músculo: está embebido en el cuerpo ciliar (*región oscura y rizada*). El músculo ciliar y las zónulas se ocupan del control principal de la capacidad de acomodación del cristalino: el cambio de forma por el que aumenta su poder de enfoque. Hacia los 45 años de edad suele perderse la facultad de acomodar la vista. (La fotografía es obra de Patricia N. Farnsworth.)



la estructura interna en la respuesta a las tensiones externas, debería medirse también la distribución de fuerzas. Pero la realidad impide acometer tales mediciones directas.

Sí puede, en cambio, describirse cómo varía la forma del cristalino durante el proceso de acomodación y calcularse la magnitud y dirección de las fuerzas que deberían actuar sobre él para inducir aquellos cambios. Tal información se relacionaría con lo que se sabe sobre la arquitectura del ojo, para determinar qué estructuras podrían desencadenar las fuerzas calculadas.

Ese fue el método que adoptamos. Comenzamos por diseñar un modelo matemático del cuerpo del cristalino —el cristalino sin la cápsula. Por mor de simplicidad, nos centramos en el cristalino de un niño, de unos 10 años de edad, que puede representarse sin excesivo error por una esfera algo distorsionada, compuesta por dos hemisferios de distinto radio; uno representaría el frente del cristalino y, el otro, el dorso. Dimos por supuestas algunas hipótesis sobre la elasticidad del cuerpo del cristalino; por ejemplo, que respondía de forma diferente a la tensión ejercida en paralelo o en perpendicular al eje óptico del ojo. El modelo suponía también que, por encontrarse entrelazadas, las fibras del cristalino no podían deslizarse unas junto a otras: el único modo de que el cristalino cambiara de forma era que variara la curvatura de las fibras.

Según indicaban nuestros cálculos, todas las fuerzas que actuaban sobre la superficie del cuerpo del cristalino en acomodación eran aproximadamente iguales y se ejercían en perpendicular a la superficie del cristalino. Sugerían esos hallazgos que la cápsula, que es el receptor de las tensiones aplicadas por las zónulas y constituye el único material en contacto directo con el cuerpo del cristalino (las zónulas no penetran en el cuerpo), transformaba esas tensiones, discretas, en una fuerza com-

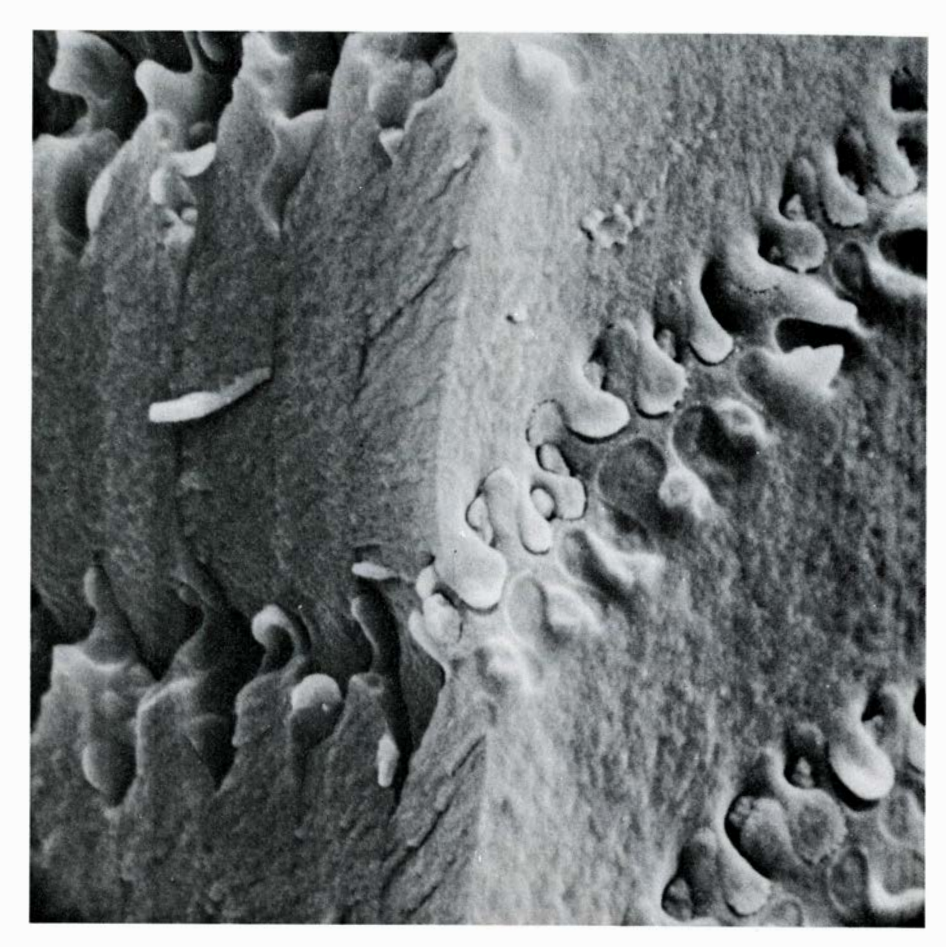
2. ESTRUCTURA DEL CRISTALINO. Las zónulas se unen a la cápsula (la membrana externa) por tres sitios: en el ecuador y en puntos algo anteriores y posteriores a éste. El interior del "cuerpo del cristalino" presenta dos zonas principales: el núcleo (el primitivo cristalino fetal) y la corteza, formada por las fibras que han ido depositándose desde el nacimiento. Las fibras se extienden desde el polo anterior al posterior y se originan de las células epiteliales (*detalle*) situadas en la parte externa del cuerpo. Esas células se elongan progresivamente en cintas, pierden el núcleo y quedan cubiertas por otras; de ese modo, el cristalino crece en espesor. Las fibras, que resisten el estiramiento pero no la flexión, van deponiéndose cual si fueran catafilos de cebolla.

presora uniforme que afectaba la superficie entera del cristalino. Al remitir la tensión de las zónulas sobre la cápsula, también lo hacía la fuerza compresora sobre el cuerpo del cristalino; disminuía asimismo la fuerza compresora en el interior del cristalino y éste experimentaba una recuperación elástica. No debía sorprender que la fuerza ejercida por la cápsula fuera perpendicular a la superficie del cuerpo del cristalino. En la fuerza que desarrollan las zónulas se distingue una componente paralela (tensora) y otra perpendicular (compresora); pero, al resistir las fibras capsulares el estiramiento, sólo se transmite al cristalino la fuerza perpendicular.

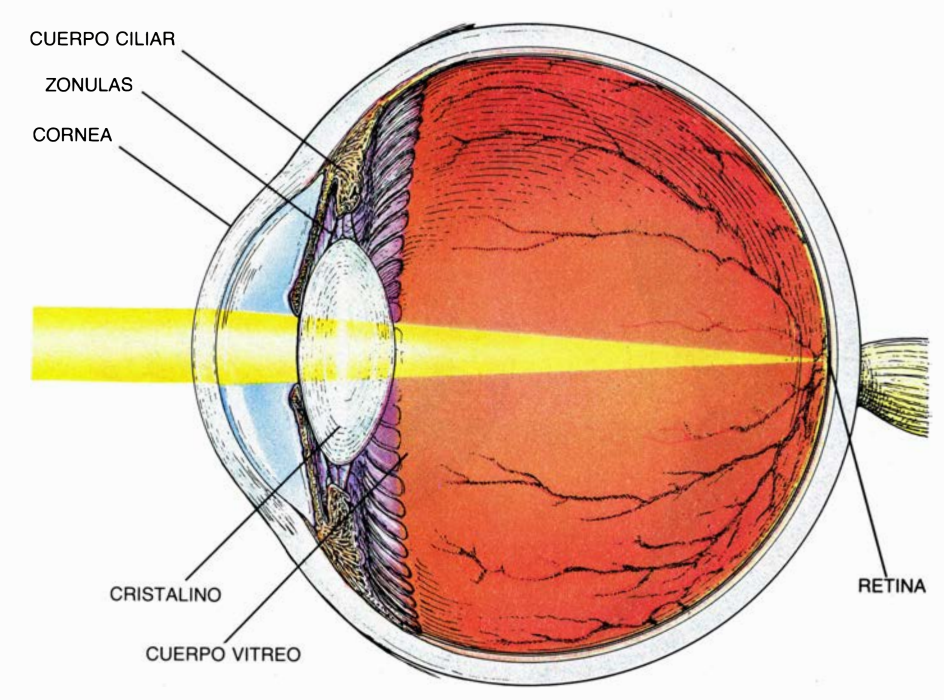
Otra consecuencia importante: la forma adoptada por el cristalino en un estado de acomodación determinado difería, a todas luces, de la que hubiera presentado si no fuera más que una bolsa de fluido. Al aplicar una presión uniforme sobre su superficie, la bolsa de fluido no adoptaría las curvaturas que se advertían en el cristalino acomodado. Por tanto, en los cambios de forma observados debía influir la estructura interna del cristalino.

Nos encontrábamos preparados ya para determinar las fuerzas ejercidas sobre el cristalino por otras estructuras oculares. La relajación de las zónulas explicaba la mayor parte del cambio de forma observado en el cristalino durante la recuperación elástica, pero no todo. Quizá, parecía deducirse, en el proceso de enfoque interviniera el humor vítreo: prestando apoyo a la parte posterior del cristalino. Resulta curioso, en ese sentido, que, a la edad en que mucha gente necesita gafas para leer, el humor vítreo, geliforme, empieza a licuarse y a perder su ultraestructura. Se desconoce la contribución exacta de esa licuefacción a la pérdida de capacidad de acomodación, pero en algo debe afectar.

El único modo de que las zónulas provocaran ese cambio previsto de las fuerzas durante la acomodación sería que perdieran tensión o que se modificara el ángulo en que aplicaban la tensión al cristalino, reduciéndose la componente compresora del esfuerzo. Según apuntaban nuestros datos, se daban ambos fenómenos. Además de relajar la tensión, las zónulas, que están unidas a la cápsula, se movían ligeramente, haciéndose paralelas a la superficie de la cápsula; cuanto mayor paralelismo mostraran, menos comprimirían el cristalino. Las pruebas recogidas por otros investigadores confir-



3. FIBRAS DEL CRISTALINO, aumentadas unos 8000 diámetros en esta micrografía tomada por Richard G. Kessel, de Iowa; se entrelazan por los bordes, como se aprecia en la imagen. Establecen también uniones con las fibras situadas por encima y por debajo suyo, como se indica en la figura 2. El entramado fibrilar afecta a la distribución de fuerzas por el interior del cristalino y determina la forma que adopta.



4. EL OJO ENFOCA los objetos refractando o desviando la luz (*cono*) reflejada por éstos, y lo hace de suerte que los rayos converjan con precisión en la retina. Las células nerviosas de esta capa convierten la luz en señales eléctricas que se transmiten hasta el cerebro, donde se interpretan. La desviación de la luz se produce en las superficies anterior y posterior de la córnea y del cristalino, pero sólo el cristalino tiene capacidad de acomodarse, de modificar su poder de refracción. El exceso de refracción provoca que la luz converja por delante de la retina, lo que impide la visión de lejos; la refracción insuficiente hace que la luz converja detrás e impide la visión de cerca. Se estima que la disminución progresiva del poder refractor que afecta al cristalino, así como de su capacidad de acomodarse, dificultan la visión de cerca a partir de la mediana edad.

maban que, al menos en un individuo (afecto de un extraño trastorno del iris que permitía observar al microscopio las zónulas, normalmente ocultas), las zónulas colgaban, sueltas, cuando el cristalino adoptaba la máxima acomodación. Sin embargo, nuestros cálculos sugerían que las fuerzas que actúan sobre el cristalino nunca llegan a anularse del todo; si lo hicieran, no habría modo de retener el cristalino en su lugar.

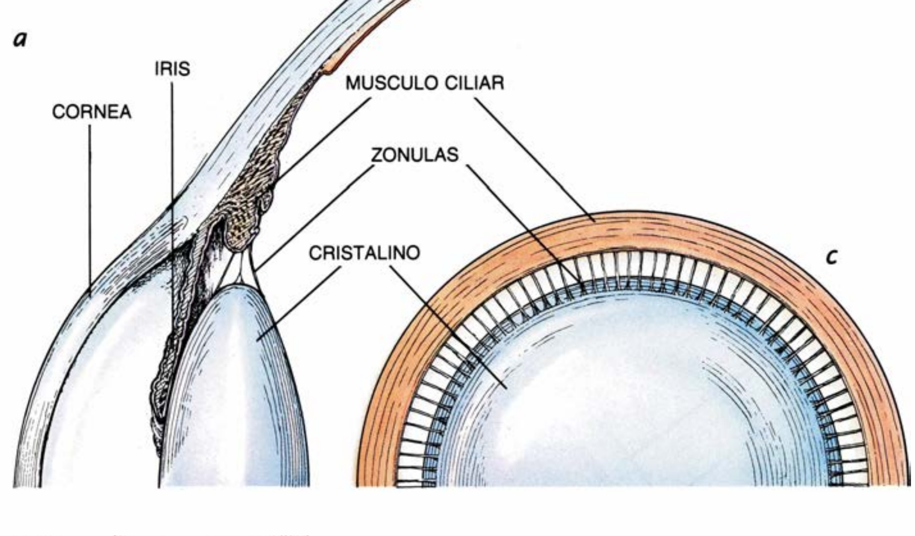
El modelo basado en el ojo joven permitió interpretar muchos detalles de la acomodación, pero no explicaba por qué el poder de refracción del ojo, y por tanto la capacidad de enfocar objetos cercanos, disminuía con la edad. El poder de refracción se mide en dioptrías, el inverso de la distancia entre el ojo y el objeto, expresada en metros. Por ejemplo, un ojo con un poder de refracción de 10 dioptrías desvía la luz lo suficiente para enfocar un objeto situado a unos 10 centímetros. En las personas que empiezan a perder la visión, el poder de refracción disminuye desde alrededor de 14 dioptrías, a los 10 años de edad —cuando podemos enfocarnos la punta de la nariz—, hasta unas nueve, a los 20 años, cuatro dioptrías a los 30, una o dos dioptrías a los 40 y casi cero a los 70. Un ojo de cero dioptrías no puede enfocar nada que se encuentre a menos distancia que el infinito. El cambio de cuatro (unos 25 centímetros) a dos dioptrías (unos 50 centímetros) o menos es el que nota la gente, porque afecta a la lectura; la mayoría de las personas mantienen los libros separados entre 30 y 40 centímetros de los ojos.

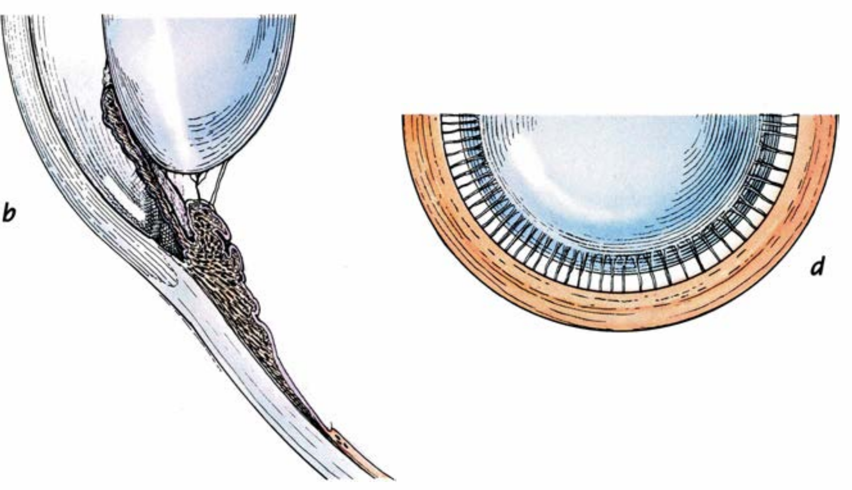
En nuestra búsqueda de la causa de esa gradual pérdida de la visión de cerca, comenzamos por recopilar la mayor cantidad de información posible sobre el cambio de forma del cristalino en función de la edad y del estado de acomodación. Luego intentaríamos determinar el efecto de esos cambios sobre poder de refracción, así como las razones probables de esos cambios. Empezamos examinando una serie de imágenes fotográficas transversales del cristalino tomadas a principios de la década de 1970 por Nicholas Phelps Brown, del Instituto de Oftalmología de Londres, y preparando 100 conjuntos similares de fotografías propias. Además de su consejo técnico, Brown nos proporcionó cuatro juegos de fotografías de sujetos de 11, 19, 29 y 45 años de edad, que enfocaban objetos situados a diversas distancias del ojo; nuestro estudio abarcaba individuos de 18 a 69 años, de ojos sanos y visión a distancia normal. Todos los "cortes" transversales eran "instantáneas" verticales que iban de la parte anterior a la posterior del cristalino; se tomaron con una lámpara de rendija, que ilumina un estrecho haz de luz en el ojo.

Una rápida visión de las fotografías confirmó el hecho, bien conocido, de que el tamaño del cristalino aumenta en función de la edad. El cristalino sin acomodar de un niño mide unos 3,3 milímetros de espesor. Con el paso del tiempo, las células que constituyen la capa externa del cuerpo del cristalino (las células epiteliales situadas en el interior de la cápsula) crecen y se transforman en las fibras acintadas que constituyen la masa del cristalino. Conforme se depositan nuevas células epiteliales sobre las fibras viejas, experimentan el mismo proceso de crecimiento que sus predecesoras y aumenta el espesor del cristalino. A los 70 años, el cristalino sin acomodar mide hasta cinco milímetros de espesor.

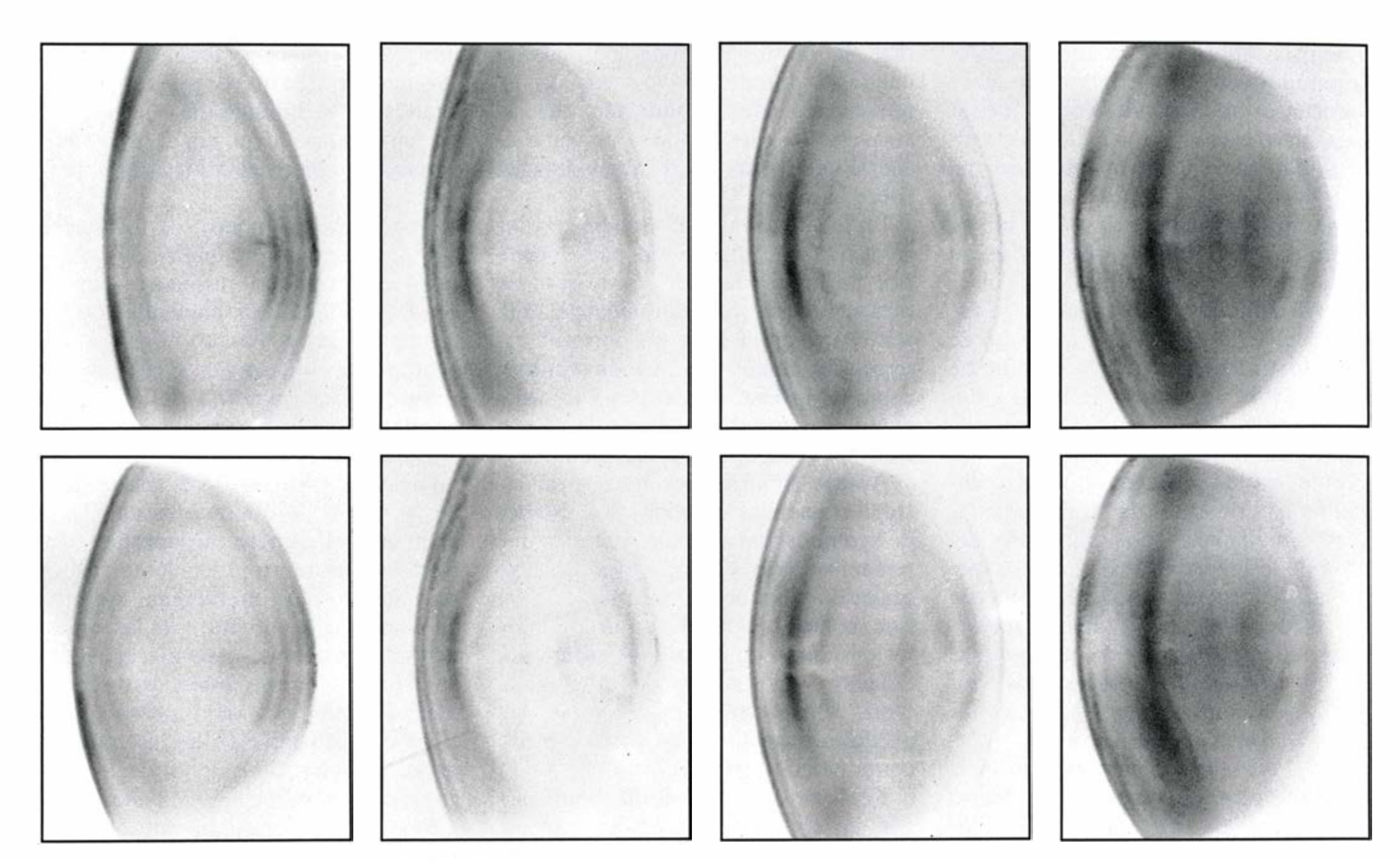
Las fotografías mostraban también una serie de bandas en el interior del cristalino: las zonas de discontinuidad. Las bandas del frente presentaban aproximadamente la misma curvatura que la superficie anterior y, las bandas del dorso, eran similares a la superficie posterior, si bien las curvas se afinaban a medida que se acercaban al núcleo del cristalino. Las bandas de los cristalinos jóvenes eran escasas y tenues. Conforme envejecía el cristalino, crecía el número y la claridad de las zonas y, en la quinta década o poco después, las zonas se fusionaban.

Basándonos en las fotografías y en otras fuentes de información creamos un nuevo modelo. Esta vez describimos las curvas superficiales e interiores de





5. AUMENTA EL CRISTALINO su poder de enfoque exagerando su curvatura. En una perspectiva lateral, la parte dorsal del cristalino no acomodado aparece bastante delgada (*a*). Con su acomodación gana en grosor (*b*); la superficie anterior se aproxima a la córnea, pero la posterior permanece en su sitio. El cambio de forma responde, principalmente, a la contracción del músculo ciliar. La perspectiva frontal muestra que el cristalino adopta el estado desacomodado (*c*) cuando el músculo se expande, alcanzando su diámetro el máximo valor. La expansión tensa las zónulas y éstas tiran del cristalino y lo comprimen. Cuando se contrae el músculo (*d*), las zónulas se relajan y el cristalino recobra la forma redondeada, como lo hacen las pelotas de goma al dejarlas sueltas. Hemos exagerado aquí las variaciones en aras de una mayor claridad.



6. CAMBIOS RELACIONADOS CON LA EDAD; algunos se distinguen fácilmente en estas fotografías con lámpara de rendija de cristalinos sin acomodar (*arriba*) y en su máxima acomodación (*abajo*) de sujetos de 19, 33, 45 y 69 años de edad (*de izquierda a derecha*). (Su máximo poder de enfoque es, respectivamente, de 9, 4,5, 1 y 0,25 dioptrías; los valores inferiores significan menos poder.) Se muestran secciones transversales, verticales y anteroposteriores; el frente del cristalino está a la izquierda. Los cambios consisten en un progresivo aumento del crecimiento y de la curvatura y, en cristalinos de personas de 45 y 69 años de edad, en la pérdida casi absoluta de la acomodación. También se observan ciertas bandas oscuras: las zonas de discontinuidad. Conforme envejece el cristalino, las bandas se multiplican y se hacen más conspicuas; las zonas se fusionan cuando el cristalino tiene más de 45 años. Según proponen los autores, el crecimiento en espesor del cristalino y el aumento de la fracción de proteína soluble en esas zonas contribuyen a la disminución de la naturaleza refractora del cristalino relacionada con la edad. Durante algún tiempo, la exageración de la curvatura compensaría en parte esa pérdida; como lo haría el incremento de superficies refractoras que brindan las zonas. Sin embargo, esos mecanismos de nada deberán servir cuando el cristalino deje de acomodarse.

los cristalinos en términos matemáticos. (Puesto que se trataba de parábolas, podían describirse con ecuaciones sencillas.) Por extrapolación de los cortes transversales, determinamos luego la forma del cristalino entero en todos los estados de acomodación y en función de la edad. Ello nos permitió realizar comparaciones y observar el movimiento de determinados puntos del cristalino durante el enfoque.

Las comparaciones revelaron que el crecimiento en espesor del cristalino a lo largo de la vida conferían a la lente sin acomodar una forma cada vez más curvada. Además, en las personas de menos de 45 años, cuanto más viejo era el cristalino, más acusada era su curvatura para cualquier estado de acomodación. (Brown lo había descubierto, para su sorpresa, en la muestra en que trabajó.) Por citar un ejemplo, el cristalino de 33 años de edad era más curvo que el de 19 a la misma distancia de cerca. Brown denominó paradoja del cristalino ese incremento de la curvatura con la edad, pues lo predecible era que los cristalinos de curvatura más cerrada dieran un poder de refracción superior al de los de curvatura menor.

Al examinar los movimientos de determinados puntos de la superficie del cristalino y del interior conforme se acomodaba el ojo, descubrimos un efecto paralelo: durante la acomodación y con la misma cantidad de movimiento, se registraba, en los ojos viejos, un cambio de foco menor que en los jóvenes. Expresado de otra manera: según mostraban los datos, para alcanzar un aumento del poder de enfoque de una dioptría, los puntos situados sobre el cristalino de más edad debían moverse más que los del cristalino joven.

Dimos con otro hallazgo fundamental. El intervalo total del movimiento disminuía gradualmente con la edad. En efecto, a partir de los 45 años, aproximadamente, el frente del cristalino no podía cambiar de forma ni, por tanto, acomodarse. Parecía bloqueado en el estado no acomodado. Ello sugería varias cosas: cada vez les costaba más a las zónulas anteriores relajarse cuando el músculo ciliar se contraía para alcanzar la acomodación; que sí se relajaban, pero no podían transmitir su influencia al cristalino, o ambas cosas a la vez. No podrían relajarse las zónulas si, por haberse engrosado el cristalino, el frente quedaba tan lejos del músculo ciliar que la lente mantenía tensas las zónulas. Estas se unen al cristalino en un ángulo distinto según esté o no acomodado; difiere también la unión cuando el cristalino está engrosado por la edad de cuando es un órgano joven y delgado. Puede que los filamentos acaben ejerciendo una fuerza más o menos tangencial sobre la superficie del cristalino. Llegados a ese estado, la relajación de las zónulas apenas incidiría en la forma del cristalino, que a su vez mostraría una escasa recuperación elástica, en el caso de que mostrara alguna.

En otras palabras, la presbicia —así se conoce la pérdida de visión de cerca relacionada con la edad— parece constituir un trastorno de la geometría, resultante en gran medida del cambio de la forma y de las relaciones angulares entre el cristalino y las zónulas.

Creemos que la geometría explica por qué los cristalinos de las personas de más de 45 años ya no pueden aco-

modarse. Ahora bien, ¿cómo justificar la paradoja de Brown? ¿Por qué, para enfocar, el cristalino viejo tiene que ser más curvo que el joven? Cabe la posibilidad de que cambie la naturaleza del citoplasma de las fibras del cristalino, y disminuya así el índice de refracción de la lente; mide éste la capacidad de un material para refractar la luz. Si con la edad disminuye el índice de refracción, se resuelve la paradoja: el aumento de curvatura no incrementaría el poder de enfoque del cristalino, sino que compensaría en parte la disminución de la naturaleza refractora del medio.

Para explorar esa posibilidad realizamos experimentos de "trazado de rayos": simulaciones, por ordenador, del paso de la luz a través de los ojos que habíamos fotografiado. Se describieron los factores que condicionan la trayectoria de la luz, verbigracia, la curvatura de los cristalinos en los estados acomodados (bien enfocados), la curvatura de la córnea y el espacio entre la córnea y el cristalino y entre el frente y la parte posterior del cristalino. (Además de la curvatura, sobre el paso de la luz influye la distancia entre las superficies refractoras; las superficies poco separadas desvían más la luz que las distantes.) Luego asignamos a cada parte del ojo un índice de refracción —siempre valores reconocidos en la bibliografía— y ordenamos al computador que desviara la luz en el límite entre materiales de índice de refracción distinto. Si el índice de refracción global permanecía constante durante toda la vida, las simulaciones habrían indicado que, al atravesar los ojos, la luz se desviaba de suerte que siempre enfocaba la imagen sobre la retina.

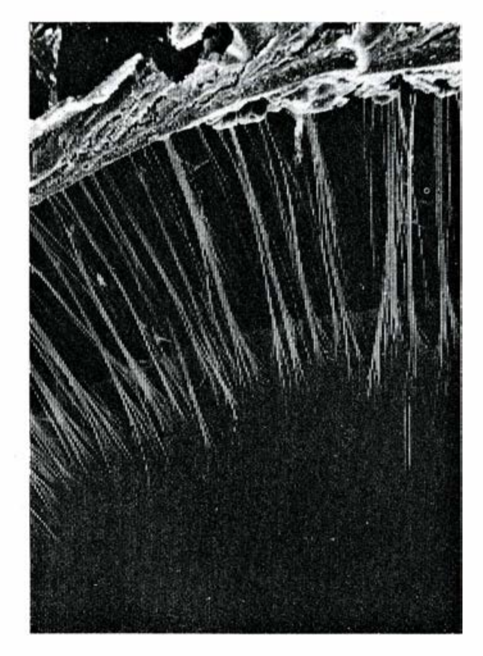
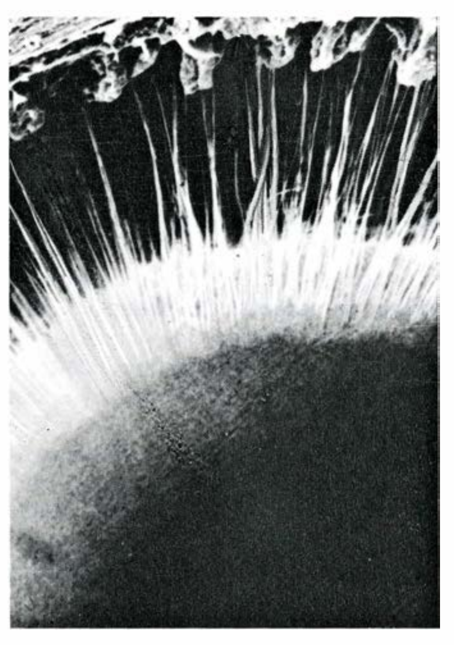
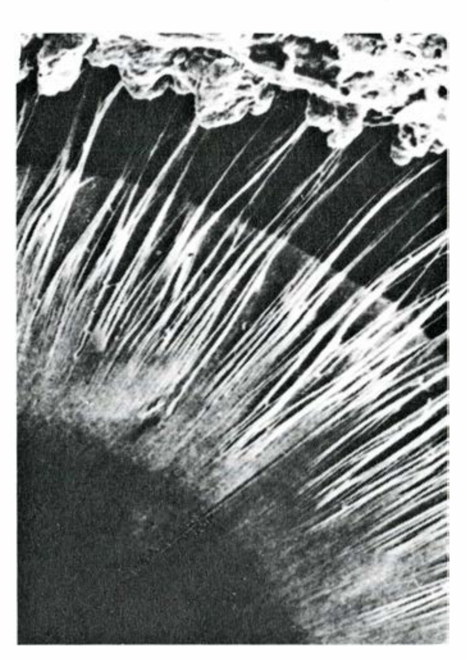
En la simulación más sencilla, la luz se desvió en el frente y la parte posterior de la córnea y del cristalino. En otra simulación consideramos que el límite entre el núcleo y la "corteza" externa del cristalino actuaban también como superficies refractoras y les asignamos su respectivo índice de refracción, de valor asimismo aceptado.

Ambas simulaciones fracasaron estrepitosamente. En todos los estados de acomodación y edades para los que teníamos datos, el punto focal de la simulación se situó por detrás de la retina, como si el poder de refracción de los cristalinos de los sujetos pecara por defecto. Algo fallaba en el modelo. Quizá debían considerarse también superficies refractoras las zonas de discontinuidad.

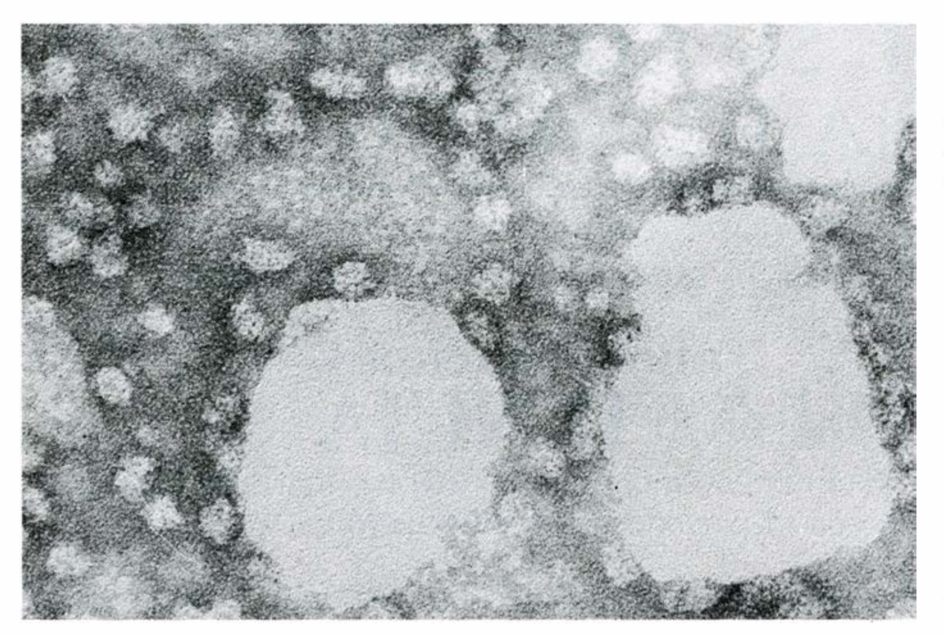
Realizamos otra serie de simulaciones, en las que mantuvimos constante el índice de refracción global del cristalino y variábamos los índices de las zonas. Esta vez, la simulación permitió enfocar al ojo de un sujeto de 45 años, pero las simulaciones con sujetos más jóvenes seguían desenfocadas. Además, cuanto más joven era el sujeto, tanto peor enfocaba el ojo simulado. Los resultados daban a entender que el índice de refracción global de los ojos jóvenes era algo mayor que los valores citados en la bibliografía y, también, que cuanto más joven era el sujeto más variaba el índice del valor aceptado.

Visto de otro modo, los resultados indicaban que el índice de refracción del cristalino disminuía con la edad. Resultado que coincidía con los cambios del cristalino en función de la edad presentados antes. Si el índice de refracción del material del cristalino perdía con la edad, sólo podría frenarse esa reducción incrementando la curvatura de las superficies del cristalino o de las zonas de discontinuidad, o aumentando el número de superficies refractoras del interior de la lente. Todos esos mecanismos intervenían. Además de aumentar la curvatura de las superficies del cristalino, al envejecer, el ojo desarrollaba nuevas zonas de discontinuidad, cada vez más curvadas. En efecto, la contribución de las zonas al poder de refracción global del ojo va ganando importancia con la edad.

Sigue sin resolverse la naturaleza de las zonas de discontinuidad que tan claras aparecen en las imágenes tomadas con la lámpara de rendija. El examen ultraestructural del cristalino no aporta ninguna prueba de su existencia. Más todavía, la concentración de proteína, medida en función de la distancia a la superficie del cristalino, muestra un pequeño y suave incremento, pero no la

7. SITIOS DE UNION de las zónulas en la superficie anterior del cristalino; van cambiando con el envejecimiento y desarrollo de éste. En la lente de un joven de 17 años de edad (*izquierda*) las zónulas se encuentran cerca del ecuador. Aparecen insertas en puntos anteriores en sujetos de 46 y 85 años de edad (*centro y derecha*). Conforme avanzan las zónulas, se modifica el ángulo que subtienden el cristalino y el filamento. Según propone la hipótesis de los autores, el cristalino acaba perdiendo la capacidad de acomodarse en parte porque las zónulas se disponen casi paralelas al frente del cristalino. La relajación de la tensión que ejercen las zónulas en respuesta a la contracción del músculo ciliar apenas afectaría entonces al cristalino. Las fotografías son obra de Farnsworth, quien propuso que la pérdida de capacidad de acomodación de los ojos envejecidos debíase a variaciones de la geometría de la reunión entre la zónula y el cristalino.



8. ALFA-CRISTALINA, la principal proteína del cristalino. Suele presentarse como hojas planas (*formas mayores*) susceptibles de disgregarse en esferas insolubles de pequeño tamaño (*manchas menores*). Las esferas pueden reagruparse en cuerpos con forma de varilla, capaces de adherirse entre sí. Si, como se supone, los agregados crecen mucho, dispersarán gran cantidad de luz. Esa dispersión explicaría la presencia de las zonas de discontinuidad de las fotografías mostradas en la figura 6. La naturaleza insoluble de las partículas explicaría también la disminución de la capacidad de refracción relacionada con la edad que sufre el cristalino. El diámetro de las esferas que aparecen en la imagen es de unas 11 milmillonésimas de metro.

alternancia de incrementos y disminuciones que sería de esperar si las bandas oscuras respondieran a diferencias de su concentración. ¿Por qué, entonces, se distinguen con tanta nitidez esas zonas en las fotografías?

La respuesta, según concluimos, debía residir en la naturaleza de la técnica fotográfica, que proyectaba al ojo el haz de rendija y generaba una imagen de la luz reflejada en una cámara fotográfica, situada al lado de la fuente de luz original. (La película de la cámara se inclinaba para compensar la distorsión angular.) Razonamos que, para que en las fotografías aparecieran las zonas de discontinuidad, el material de esas regiones debía interactuar con la luz de forma distinta de como lo hacía con el material de las regiones adyacentes. En particular, si la proteína de las regiones correspondientes dispersaba la luz sufientemente, en las fotografías deberían aparecer bandas oscuras. ¿Resulta verosímil esa dispersión?

A primera vista se diría que no. Según se cree, la alfa-cristalina del ojo, la principal proteína de las que componen el cristalino, se asocia en agregados cuyo tamaño es inferior al tamaño mínimo que provocaría la dispersión de luz. Sin embargo, se ha comprobado que el tamaño de esas partículas aumenta en respuesta al incremento de la temperatura; se sabe también que cambia en respuesta a pequeñas variaciones del *p*H o de la concentración de calcio. Muchos oculistas han demostrado que, aunque la concentración de proteínas del ojo permanezca constante a lo largo del tiempo, aumenta la fracción correspondiente a la proteína insoluble —y por tanto particulada.

Tales hallazgos permiten sospechar que, con el tiempo, la alfa-cristalina formaría agregados mayores de lo que se creía. Si ello fuera cierto, la presencia de un número significativo de macropartículas de alfa-cristalina insoluble no sólo explicaría la aparición de zonas de discontinuidad en nuestras fotografías, sino también el deslumbramiento; en virtud de este fenómeno, la luz intensa deja en blanco la totalidad del campo visual. El deslumbramiento se produce con frecuencia en personas de 40 años o más, a los que molestan en especial los días soleados y los faros de los automóviles que circulan de noche en sentido contrario. Nuestros datos sugieren que el grado de dispersión es mínimo en las primeras décadas de vida, para luego aumentar de manera paulatina.

El incremento de las partículas de proteína insoluble explicaría también por qué disminuye con la edad el índice de refracción del cristalino. El índice de refracción de una solución (el citoplasma de una fibra del cristalino, por ejemplo) depende de la naturaleza y concentración de sus solutos. Al añadirse proteína soluble a un medio acuoso, aumenta el índice de refracción del medio. Por el contrario, si una gran fracción de la proteína forma partículas insolubles de gran tamaño, el índice de refracción disminuye notablemente. Quizás ocurra así en el cristalino.

Deben invocarse factores microscópicos y factores macroscópicos para explicar por qué el punto más cercano de visión clara va apartándose progresivamente con el transcurso del tiempo. Según nuestra hipótesis, el aumento de la cantidad de proteína insoluble que contiene el cristalino, el crecimiento de éste (y, por tanto, el distanciamiento de la parte anterior y posterior del cristalino) y la concomitante reducción del índice de refracción tienden a dificultar la visión de cerca. Esa capacidad se resiente de la progresiva reducción de la capacidad de acomodación del cristalino, probablemente fruto de una modificación gradual de la geometría del complejo que forman el cristalino, las zónulas y el músculo ciliar. Neutralizan en parte esos procesos —al menos durante un tiempo— el desarrollo de más superficies refractoras (las zonas de discontinuidad), el agudizamiento global de la curvatura del cristalino y una acomodación hipertrofiada. Pero, cuando el humor vítreo se licúa, de nada sirven los mecanismos de compensanción y el cristalino pierde la capacidad de acomodación.

Quizás algún día los investigadores avancen hasta invertir o impedir la pérdida natural de la visión de cerca producida por la edad. Mientras tanto, resultará inevitable usar gafas para leer; tan inevitable como la muerte o los impuestos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ANALYSIS OF HUMAN CRYSTALLINE LENS CURVATURE AS A FUNCTION OF ACCOMODATIVE STATE AND AGE. J. F. Koretz, G. H. Handelman y N. P. Brown en *Vision Research*, vol. 24 n.º 10, págs. 1141-1151; 1984.

ON THE HYDRAULIC SUSPENSION THEORY OF ACCOMODATION. D. Jackson Coleman en *Transactions of the American Ophthalmological Society*, vol. 84, págs. 846-868; 1986.

MODELING AGE-RELATED ACCOMODATIVE LOSS IN THE HUMAN EYE. Jane F. Koretz y George H. Handelman en *Mathematical Modelling*, vol. 7, págs. 1003-1014; 1986.

A POSSIBLE STRUCTURE FOR α-CRYSTALLIN. Robert C. Augusteyn y Jane F. Koretz en *FEBS Letters*, vol. 222, n.º 1, págs. 1-5; septiembre, 1987.

La comunidad del cañón del Chaco

De este antiguo emplazamiento anasazi quedan las ruinas de nueve moradas, de varios pisos, conectadas con el mundo exterior por un complejo sistema de caminos. ¿Cuál fue el motivo de su construcción? ¿Quién vivía en ellas?

Stephen H. Lekson, Thomas C. Windes, John R. Stein y W. James Judge

El noroeste de Nuevo México es un desierto árido, y poco acogedor, aunque de una belleza espectacular. La vegetación escasea. Las precipitaciones tienen una media de unos 230 milímetros al año, la mayor parte de ellas en forma de intensos y a menudo destructores aguaceros a finales del verano. En invierno, la temperatura llega a menudo hasta los 30 grados bajo cero; en verano alcanzará los 38 grados. Es difícil imaginar la vida en un entorno tan severo e implacable. Sin embargo, en un tramo de unos 16 kilómetros del cañón del Chaco, en el corazón de la cuenca del San Juan, hay restos de lo que fue una próspera comunidad construida hace casi 1000 años por los anasazi, antepasados de los actuales pueblos. La comunidad conoció en otro tiempo una gran actividad: se construyeron canales de riego, se nivelaron los campos y se tendió una red viaria en Chaco y sus alrededores. Ahora quedan sólo los restos de unos centenares de edificios con muros de piedra. Entre ellos –y parcialmente en pie todavía hoy– se encuentran las ruinas de nueve estructuras de varios pisos: las Casas Grandes de Chaco.

Durante más de un siglo, los arqueólogos se han sentido impotentes para interpretar dichas ruinas e identificar la gente que las construyó. El tamaño imponente y la planificación de las Casas Grandes era inaudito y sin parangón en el mundo anasazi contemporáneo. Su elaborado diseño y su magnitud nos remite a una comunidad próspera, casi urbana, y a una población residente de miles de personas. ¿Cómo explicar la presencia de una floreciente comunidad en un cañón, desierto y solitario?

En 1972 el Servicio del Parque Nacional, en cooperación con la Universidad de Nuevo México, creó un equipo multidisciplinar para abordar el "fenómeno de Chaco", expresión que designaba la confusa historia cultural del asentamiento. Reuniendo especialistas de distintas áreas de conocimiento se esperaba poder alcanzar una visión fiel y coherente de la historia de Chaco. Queríamos saber, por ejemplo, cómo se las ingeniaban los habitantes de Chaco para subsistir en un entorno tan hostil. Confiábamos en averiguar la evolución de la población con el tiempo y la interacción desarrollada entre los habitantes de Chaco y otros grupos prehistóricos. Sobre todo, pretendíamos descubrir qué misión cumplían las Casas Grandes y sus caminos en la vida de sus habitantes.

Construidas en periódicos estallidos de actividad, aproximadamente del 900 al 1115 d. C., las Casas Grandes constituyen el elemento central de la cultura del Chaco. Hay nueve: Peñasco Blanco, Pueblo Alto, Kin Kletso, Hungo Pavi, Pueblo del Arroyo, Pueblo Bonito, Chetro Ketl, Una Vida y Wijiji.

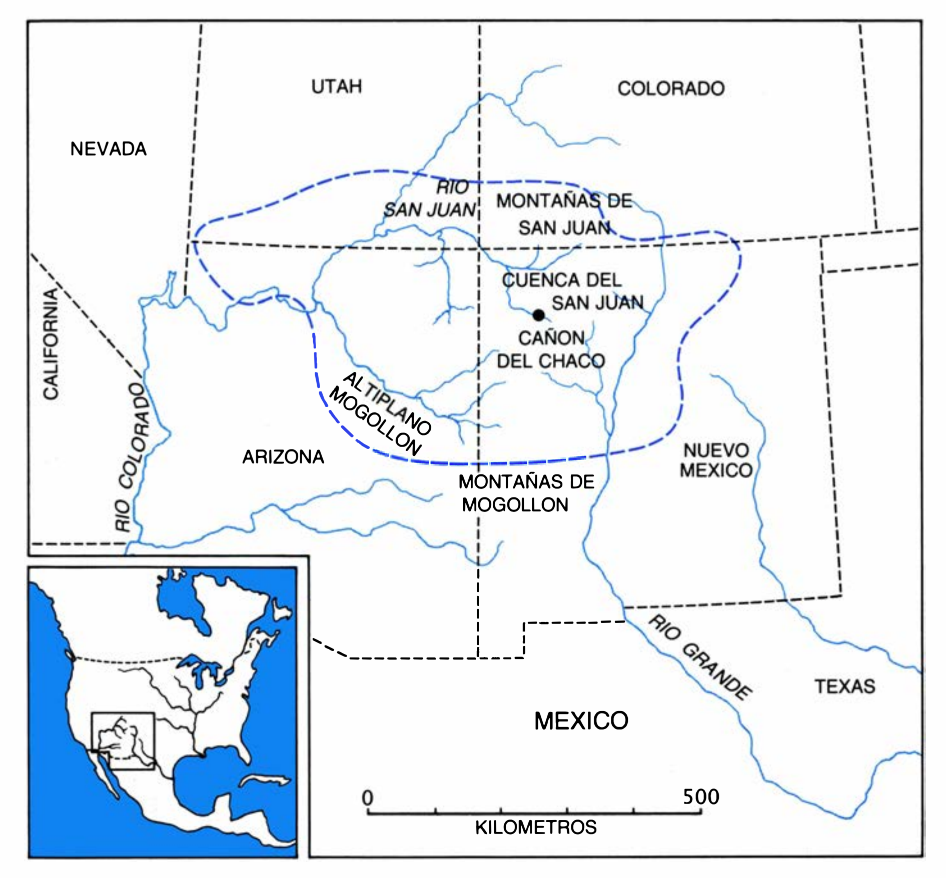
De las nueve Casas Grandes la más famosa y más minuciosamente estudiada es Pueblo Bonito. Situada en la base de una mesa de unos 30 metros de altura en la cara norte del cañón, presenta una característica forma en D y ocupa una hectárea larga de tierra. Aunque no queda en la actualidad casi nada de sus pisos superiores, permanecen todavía en pie algunas secciones que tienen cuatro o cinco pisos. Una vez terminada, allá por el siglo XII, contaba con más de 650 habitaciones. Era la mayor de las Casas Grandes.

Pueblo Bonito y las demás Casas Grandes del cañón están construidas con bloques de arenisca, cuidadosamente alineadas (en sentido horizontal) y dotadas de bellas formas. Estas formas de albañilería, que son todas ellas complejas y específicas para cada período, constituyen un rasgo distintivo de la arquitectura de Chaco. Los bloques de arenisca encajan con gran precisión unos con otros; forman paredes de una anchura máxima de un metro a ras de suelo y decrecen ligeramente en los pisos sucesivos. Las paredes son mucho más fuertes que los de otros establecimientos anasazi. En ese sentido, se necesitaron unos 45.000 ki-

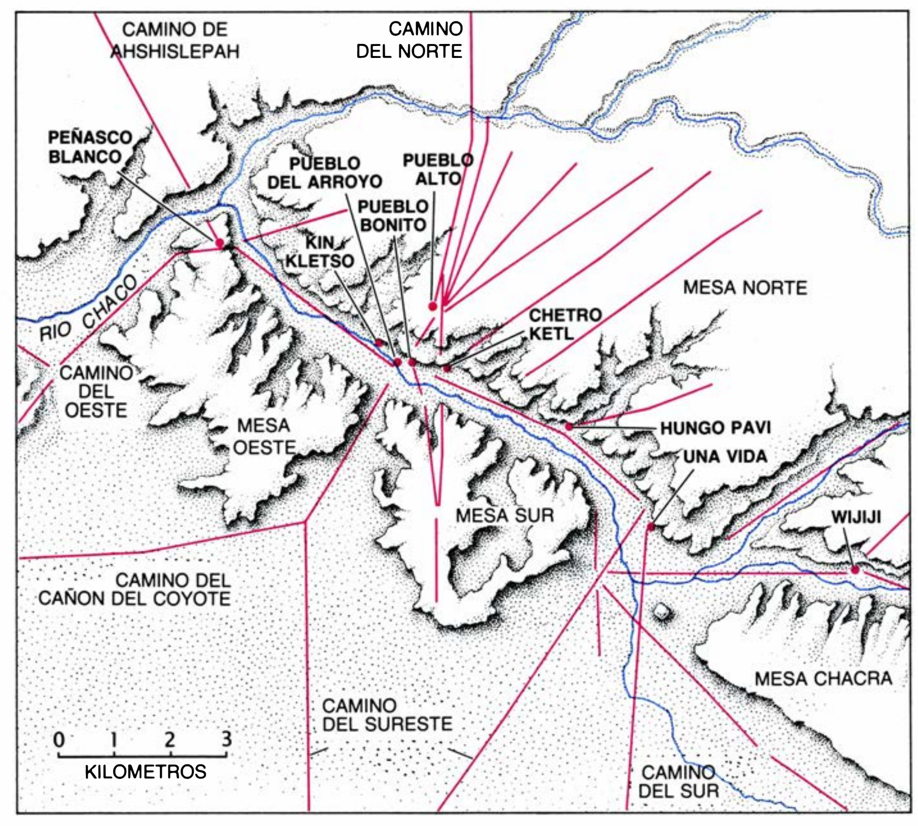
STEPHEN H. LEKSON, THOMAS C. WINDES, JOHN R. STEIN y W. JAMES JUDGE trabajaron juntos en la arqueología del cañón del Chaco durante más de 10 años. Lekson se formó en las universidades de Case Western Reserve y Eastern New Mexico. Trabaja hoy como investigador en el Museo estatal de Arizona en Tucson. Windes es arqueólogo de plantilla del servicio del parque nacional de Santa Fe. Procede de las universidades de Carolina del Norte y de Nuevo México y se ocupa ahora de la interrelación entre las culturas de Chaco y de Mesa Verde. Stein, que se licenció en la Universidad de Nuevo México en 1974, es arqueólogo de la Navajo Tribal Utility Authority en Nuevo México. Está interesado en el sistema viario de Chaco y en las Casas Grandes fuera del cañón. Judge dirige el centro de investigación Fort Burgwin de la Universidad metodista del Sur. Se doctoró por la de Nuevo México en 1970 y estuvo al frente de las campañas del cañón del Chaco desde 1977 hasta 1985.

1. PUEBLO BONITO, que aparece en esta fotografía aérea, se encuentra situado en la base de la pared norte del cañón del Chaco. Constituía una de las nueve Casas Grandes del Chaco y constaba de más de 650 habitaciones, muchas de las cuales hubieron de servir a un destino diferente de la vivienda propiamente dicha. Las Casas Grandes se distinguen por sus numerosas kivas: cámaras ceremoniales circulares. Las dos kivas notables que aquí se aprecian constituían unas estructuras peculiares del cañón del Chaco.





2. EL CAÑON DEL CHACO se halla en el centro de la cuenca del San Juan, en el ángulo noroeste de Nuevo México, donde convergen los estados de Utah, Colorado, Arizona y Nuevo México. La región del suroeste, que en otro tiempo estuvo ocupada por los anasazi, se indica aquí mediante una línea discontinua.



3. LAS CASAS GRANDES DEL CAÑON DEL CHACO se comunican entre sí y con las poblaciones del exterior mediante una red viaria que cruza la cuenca del río San Juan. Cuando los caminos se encontraban con acantilados, se salvaban gracias a los andamiajes, rampas de madera y escaleras construidos.

logramos de arenisca cortados a mano en los acantilados de los alrededores para construir una pequeña habitación de una de las Casas Grandes; por lo menos 50 millones de piezas de arenisca deben tallarse para construir sólo Chetro Ketl.

La construcción en altura, tipificada por los muros de albañilería, es un rasgo predominante en el cañón del Chaco. Refleja ello, presumiblemente, la importancia cultural de las Casas Grandes. Puede haber significado también que los edificios necesitaban poco mantenimiento y podían cuidarlos sin especial dificultad una población pequeña o intermitente. La geometría formal de los planos del suelo es otra característica destacada de la arquitectura de Chaco. Las habitaciones y las kivas (habitaciones circulares con una verosímil función ceremonial) están dispuestas en forma de rejilla. Las puertas y aberturas de ventilación, sin embargo, aparecen a intervalos regulares, a lo largo de cada pared, de habitación en habitación y de almacén en almacén. Precisión y complejidad lineales que sólo son posibles como resultado de un proyecto previo y la activa participación de arquitectos.

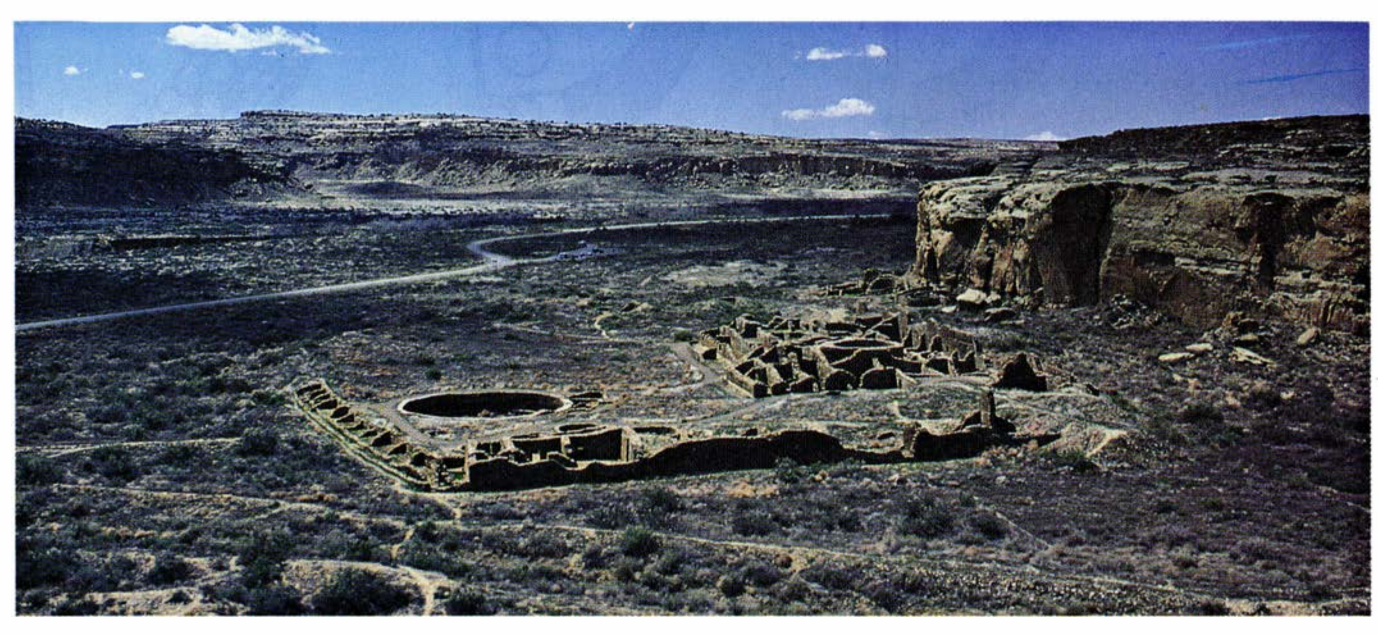
La sensación de maciza consistencia que proporciona el cañón del Chaco no procede sólo de la propia albañilería, sino también del trabajo que hubo que invertir para llevar a cabo el proyecto. De acuerdo con nuestros cálculos, para la construcción de los pisos y tejados de estas casas hubo que talar 215.000 árboles, algunos de ellos de 25 centímetros de diámetro, procedentes de bosques situados al menos a 80 kilómetros de distancia. Sigue envuelto en el misterio el modo de transporte de los mismos, a través del desierto y desde puntos tan remotos.

Ni que decir tiene que se necesitó bastante más trabajo para construir las Casas Grandes que el invertido en las otras casillas del cañón. Las primeras requerían un mayor esfuerzo, incluso por unidad de superficie, que otras obras de su época. Muchas de las técnicas de construcción descubiertas en Chaco eran las mismas que las observadas en los pequeños establecimientos anasazi del suroeste, pero la naturaleza del complejo y las ingentes proporciones de las Casas Grandes son únicas.

No sólo las construcciones son más altas, los muros más gruesos y las decoraciones de piedra más refinadas, sino que también las propias habitaciones son mayores que las edificaciones

realizadas en cualquier otro sitio durante el mismo período.

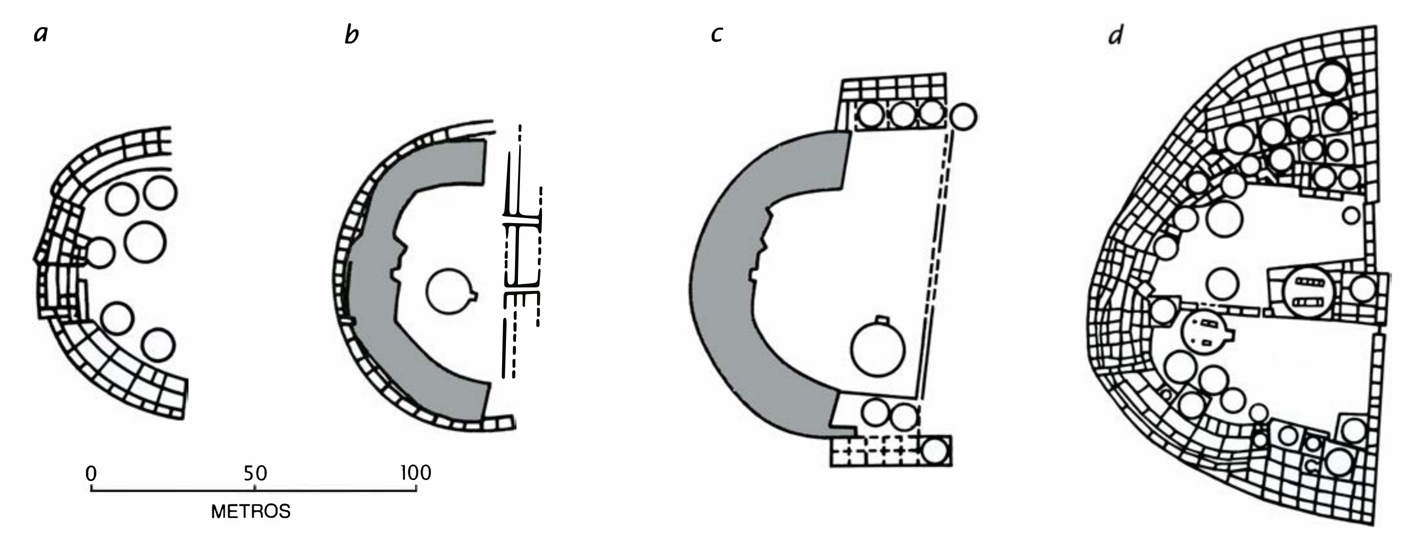
¿Cuántos trabajadores se precisaron en la construcción de las Casas Grandes? Sabemos (por los contrafuertes de las paredes y los estilos de albañilería) que las principales secciones de los edificios respondieron a proyectos individuales. ¿Requirieron las Casas Grandes un pequeño ejército de trabajadores como han sugerido algunos? Basándonos en cálculos sobre la cantidad de piedra, arcilla, agua y vigas de madera necesitadas para construir una sola habitación, estimamos que unos 30 hombres que trabajaran de dos a cuatro meses al año habrían tardado unos 10 años en acabar con éxito un proyecto de "casa grande" en Chaco. Aunque el trabajo hubiera sido duro (el acarreo de bloques de arenisca, procedentes de los acantilados vecinos, y el transporte de troncos desde 40 u 80 kilómetros de distancia no debieron ser fáciles), no



4. CHETRO KETL aparece casi camuflado para un espectador que sitúe su atalaya de observación en el borde del Cañón que mira hacia el oeste. La gran kiva del yacimiento de Chetro Ketl, cuyo diámetro mide algo más de dieciocho metros, se aprecia con toda nitidez en primer plano (*estructura circular*).



5. ABUNDAN EN EL CHACO KIVAS PEQUEÑAS, similares a las de otros yacimientos anasazi. En Pueblo Bonito se han excavado hasta 37 de ellas. Pueblo Bonito se construyó frente a un desfiladero en la pared sur del cañón (*en el horizonte, en el centro hacia la derecha*), a través del cual pasaba el camino del sur.



6. LAS CASAS GRANDES se construían en varias fases. Ilustramos aquí los añadidos de cada etapa de Pueblo Bonito. La construcción más antigua está señalada en trama oscura. Pueblo Bonito se erigió en el siglo x, como un conjunto semicircular de habitaciones y kivas (*a*); en la década de 1040 se añadieron estancias unidas por una calle a lo largo del muro norte y se construyó una gran kiva (*b*). En la década de 1050 y de 1060 se añadieron alas exteriores, destruidas y remodeladas luego (*c*). El edificio se concluyó hacia el año 1140, cuando se incorporaron más habitaciones, otra kiva grande y numerosas kivas pequeñas (*d*).

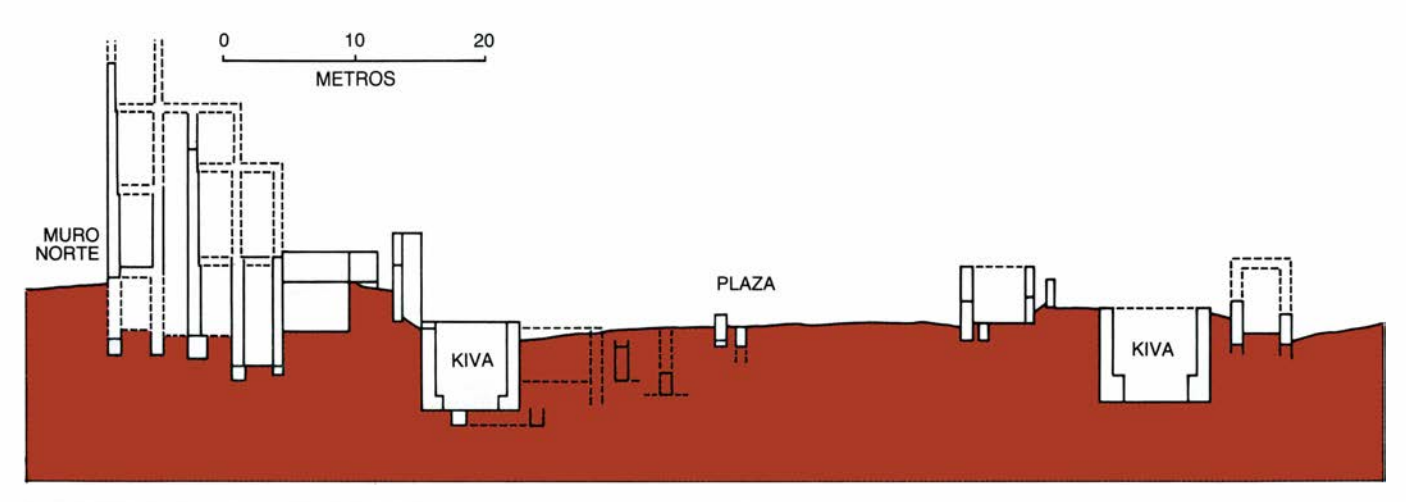
creemos que hubiera que recurrir a una población residente o a una afluencia especial de trabajadores foráneos.

Las Casas Grandes formaban parte integrante de la cultura de Chaco. Para hacernos una idea exacta de su importancia, decidimos excavar un edificio que no hubiera sido estudiado todavía. Optamos por Pueblo Alto: nadie lo había excavado y, todavía más interesante, parecía constituir el punto de llegada de varios caminos procedentes del norte, incluida la Gran Ruta del Norte. Esperábamos que Pueblo Alto nos ofreciera una mayor información sobre el sistema regional de caminos y su relación con las Casas Grandes de Chaco. Entre 1976 y 1979, excavamos el diez por ciento del asentamiento con la intención de investigar los diferentes tipos de habitación y las actividades con ellos asociadas. Eramos reacios a excavar más allá de esa extensión por un doble motivo: el esfuerzo a invertir (Pueblo Alto abarca una hectárea) y la voluntad de dejar inalterado, en lo posible, el yacimiento.

Situado en la cima del borde norte del cañón del Chaco, a un kilómetro de Pueblo Bonito, Alto domina una vista panorámica de 360 grados de la cuenca del río San Juan, una posición privilegiada en el conjunto. Se distingue también de las demás Casas Grandes del cañón por su piso único. Libre de la confusión creada por el derrumbamiento de varios pisos, pudimos obtener una perspectiva sin par de la organización arquitectónica y la planificación de las estancias del lugar.

Gracias al empleo de diferentes técnicas de datación, llegamos a la conclusión de que Pueblo Alto se construyó, en su mayor parte, entre 1020 y 1060. Perduraron, sin embargo, las obras menores y remodelaciones hasta comienzos del siglo xii. Se identificaron tres configuraciones distintas de habitaciones especiales o estancias: estancias familiares, estancias-departamento y estancias que se comunicaban con la carretera. Juntas suponen al menos las tres cuartas partes de la superficie del suelo de Pueblo Alto. Para nuestra sorpresa, las estancias familiares, que constaban de una habitación de estar unida a una cámara-depósito, representaban un porcentaje bastante pequeño del número total de habitaciones en Pueblo Alto. De acuerdo con nuestra investigación, sólo cinco de las 85 habitaciones construidas en Alto estaban destinadas a vivienda propiamente dicha y todas ellas estaban en el ala oeste del edificio.

En dos de las estancias familiares encontramos hogares de piedra y adobe, pozos de almacenamiento, comparti-



7. CORTE TRANSVERSAL DE PUEBLO BONITO donde se evidencia su planta y topografía. Se cree que, cerca del muro norte del cañón, Pueblo Bonito tenía cinco pisos de altura; el número de pisos decrecía hacia el centro de la edificación. Algunas kivas aquí señaladas fueron excavadas en la plaza central; otras fueron construidas sobre el suelo y el área que las rodeaba se rellenó a continuación con escombros. (Ilustración realizada por Tom Prentiss.)

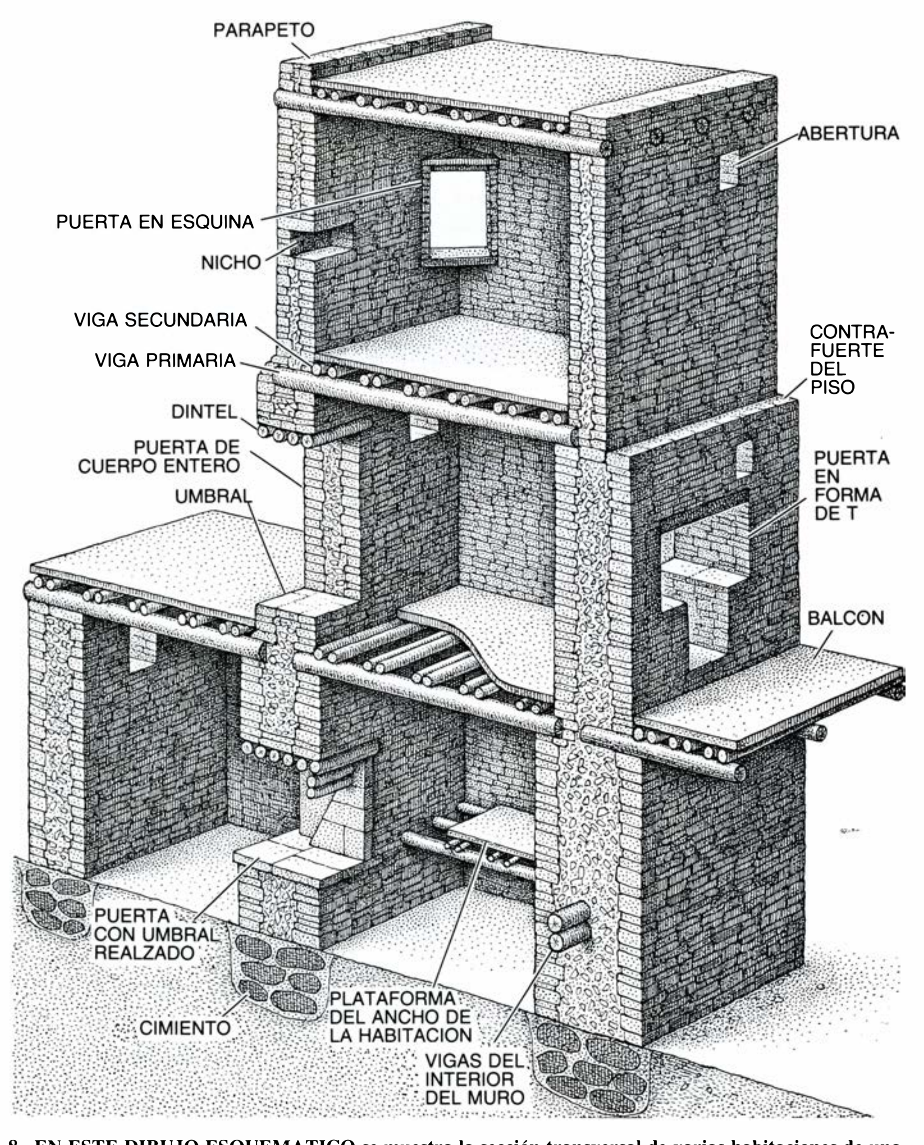
mentos para moler maíz y alacenas especiales para los alimentos. La presencia de polen y semillas quemadas de plantas comestibles indican que la comida se procesaba y consumía en estas habitaciones. Los suelos, restaurados en numerosas ocasiones, aparecían considerablemente desgastados, debido quizás al pesado trabajo doméstico. Además, el nivel de actividad en estas pocas habitaciones sobrepasaba con creces el de otras que excavamos en Pueblo Alto.

Una vez establecidas las características fundamentales de las estancias familiares de Pueblo Alto, podíamos ya buscar señales de habitación en las estancias de otras Casas Grandes. Del cotejo emergió un modelo que se repetía: encontramos sólo cinco estancias familiares en Pueblo Bonito, otras cinco en Pueblo Arroyo y no más de once en Una Vida. Según parece, todas se construyeron entre 920 y 1095 (un período coincidente con la construcción de Pueblo Alto). Creemos que en cada una de estas Casas Grandes las estancias familiares pudieron haber servido como hogar a no más de cien personas, una gran diferencia con los 5000 o más que calcularon los arqueólogos que nos habían precedido.

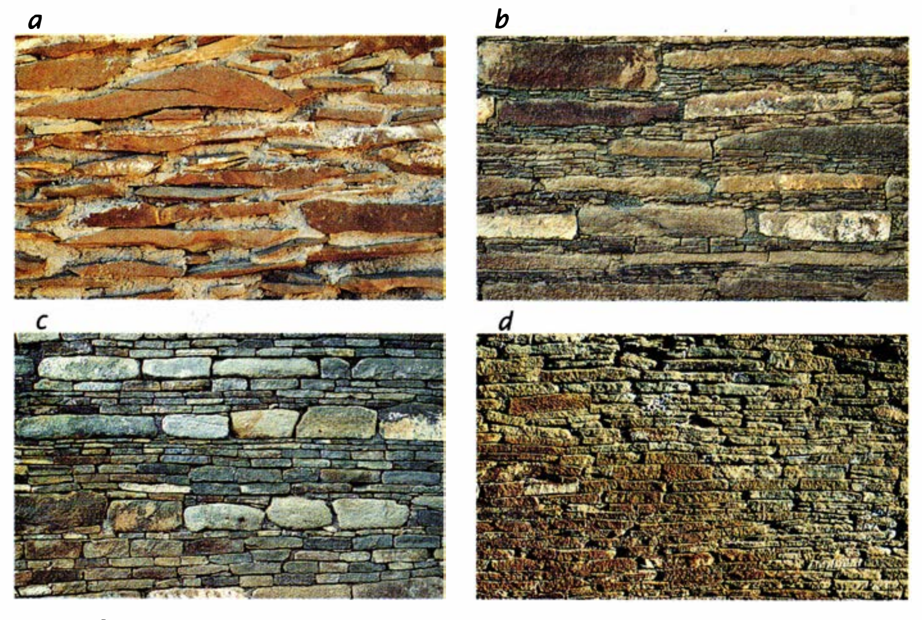
Las estancias-departamento de Pueblo Nuevo y de otras Casas Grandes sugieren también una limitada población residente. Las estancias-departamento constan de una despensa, unida a una segunda sala que pudo haber sido habitada por un número reducido de personas; están asociadas a una pequeña kiva. Como su propio nombre indica, las estancias-departamento son mayores que las de una estancia familiar; por lo general, la estancia mediría unos 100 metros cuadrados de superficie, el doble casi de una estancia familiar. Ahora bien, dentro ya de una estancia-departamento el total del espacio destinado a vivienda no supera el 15 por ciento de la superficie total, mientras que en las estancias familiares supone el 50 por ciento o más. Además, no hay puertas que unan una estancia-departamento con otra: ello viene a demostrar que estarían definidas por fronteras políticas o sociales; no hay señales de que se cocinara o comiera en ellas. Se construyeron cinco estancias-departamento tras la edificación de Pueblo Alto a comienzos del siglo XI y se añadieron otras tres en años sucesivos.

Las estancias con salida al camino son, con mucho, las más curiosas de los tres tipos de habitación que encontramos en Pueblo Alto. Se trata de pequeñas despensas interconectadas y construidas en fila a lo largo de la parte exterior del edificio; se hallan abiertas directamente a las calles adyacentes. Un aspecto insólito de estas estancias reside en su absoluta inaccesibilidad desde el interior del inmueble. Si las Casas Grandes sirvieron originalmente como vivienda, cabría esperar que los almacenes fueran accesibles para sus habitantes. La existencia de puertas que dan sólo al exterior del edificio implica, sin embargo, que las estancias constituían almacenes, unidos por la calle, y demuestra también que los habitantes tenían sobre ellos un control limitado. El hecho de que se construyeran estancias unidas mediante una calle en Pueblo Alto, Pueblo Bonito y Chetro Ketl, y probablemente en Peñasco Blanco, por la misma época (en la década de 1040), sugiere que se edificaron, muy verosímilmente para un propósito común.

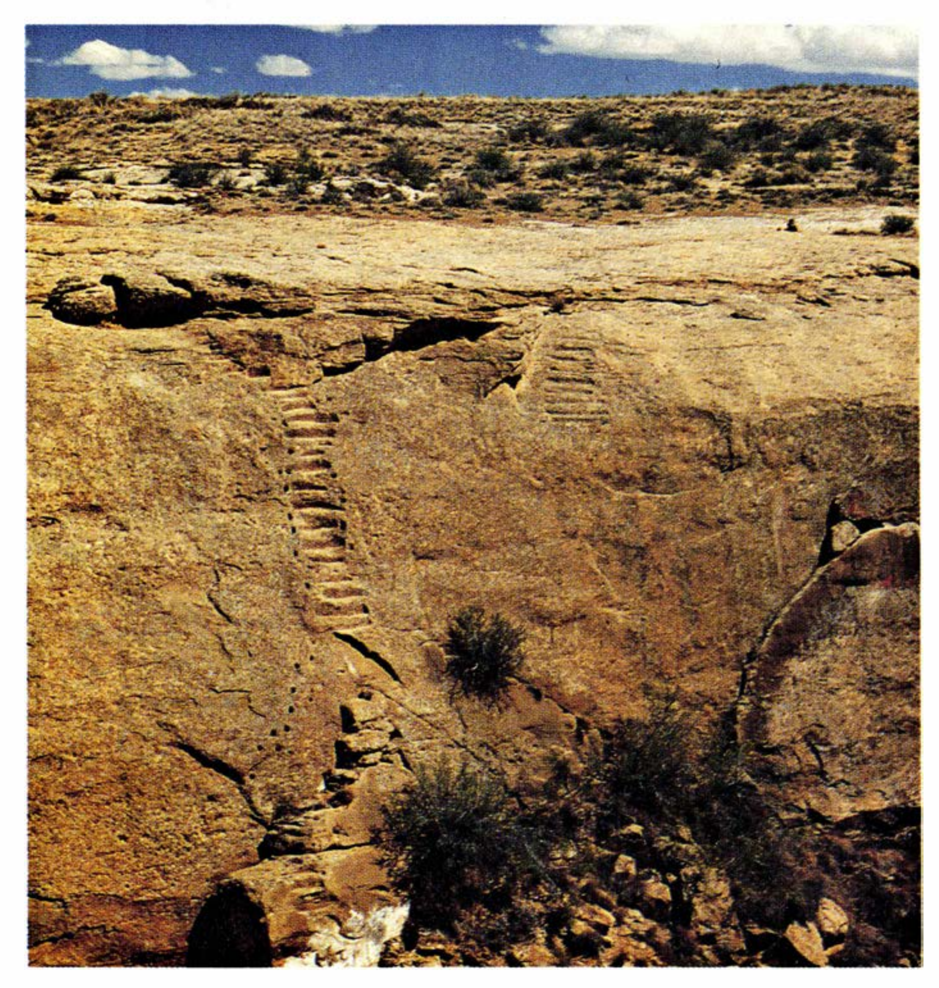
La arquitectura de Pueblo Alto ofrece más puntos de interés. Lo mismo que el resto de las Casas Grandes, posee una plaza central: una gran superficie abierta en el interior de los muros de la construcción. A diferencia de las plazas de otras viviendas menores del cañón, cuyo suelo habíase allanado pisando sobre él, la plaza de Pueblo Alto se revestía periódicamente con gruesas capas de arcilla. La plaza debía desempeñar una función especial en la vida de los habitantes de Chaco, tal vez como centro de reunión en determinados momentos del año; pero al margen de esto poco más sabemos. Descubrimos una segunda plaza en Pueblo



8. EN ESTE DIBUJO ESQUEMATICO se muestra la sección transversal de varias habitaciones de una Casa Grande típica del Chaco. La potencia de la estructura se pone de manifiesto por la anchura de los muros. Los suelos estaban construidos mediante vigas de pino primarias y secundarias (apoyadas en ángulo recto unas sobre otras) y posteriormente recubiertas con un revocado de barro. Las habitaciones estaban bien ventiladas para proporcionar la adecuada circulación de aire. En cada una de las Casas Grandes puede apreciarse distintas clases de puertas: en esquina, en forma de T y rectangulares de cuerpo entero.



9. ALBAÑILERIA de las Casas Grandes. Muy estilizada, puede agruparse en cuatro tipos fundamentales. El más antiguo (*a*) es bastante tosco, formado por bloques irregulares de arenisca unidos por grandes cantidades de barro (reemplazado aquí por cemento); el segundo consiste en bloques de arenisca combinados o reforzados por pequeños trocitos planos de roca (*b*). Los tipos tercero y cuarto, más recientes, pertenecen a finales del s. XI. El tipo tercero se caracteriza por hileras de grandes bloques de arenisca que alternan con hileras de piezas menores (*c*); el cuarto está construido con piezas planas muy regulares de arenisca (*d*).



10. A VECES SE TALLABAN ESCALINATAS en los acantilados que bordean el Chaco para facilitar el movimiento de entrada y salida del cañón. Esta escalinata fue construida aproximadamente a un kilómetro al norte de Chetro Ketl y recorre unos 23 metros en vertical hasta la superficie superior del acantilado. A la izquierda de los escalones se ven, también tallados en la roca, asideros para las manos. A la derecha de la escalinata, se insinúa el arranque de un segundo conjunto de escaleras, que nunca se llegó a concluir.

Alto, fuera ya del edificio, que señala la confluencia de varios caminos; tendría que ver con el comercio más que con cualquier ceremonia.

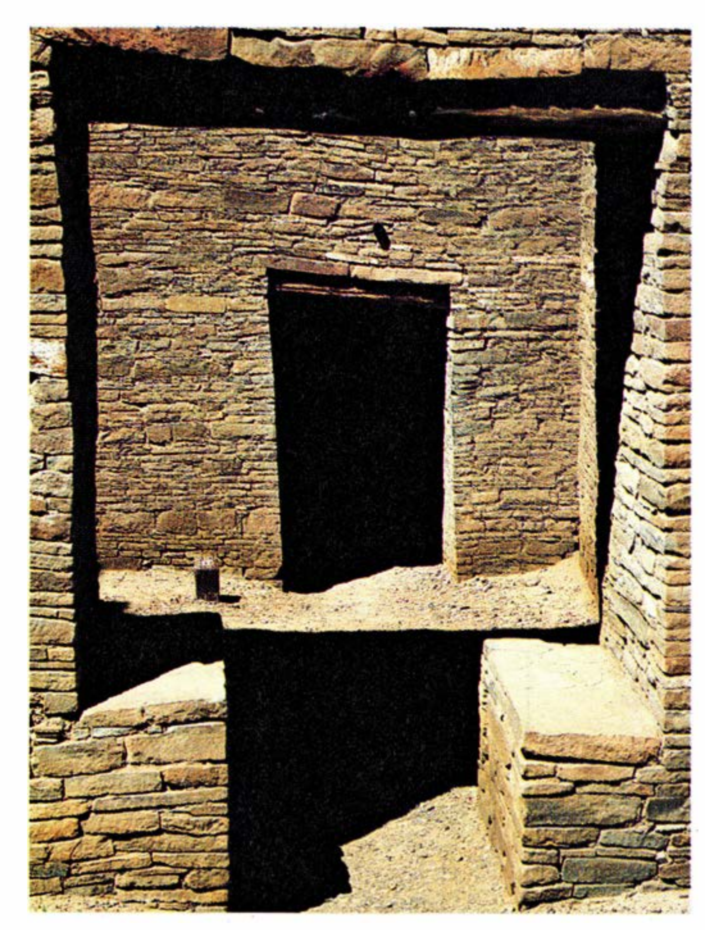
Nuestra excavación sistemática de Pueblo Alto desembocó en la recuperación de un extraordinario número de objetos. Hallamos más de 204.000 piezas (tiestos, trozos de piedras y restos de comida), 70.000 de ellas procedentes de un montículo de desperdicios que ocupaba 2400 metros cúbicos de espacio y de una altura de cuatro metros. ¿Cómo pudo la pequeña población estable de las estancias familiares haber producido semejante número de artefactos? De acuerdo con nuestros cálculos, en un período aproximado de 60 años se arrojaron al montículo más de 150.000 recipientes de cerámica. Si nuestra estimación de la cifra de residentes permanentes en Pueblo Alto es correcta, tendremos 2500 recipientes por año o 25 vasijas por persona y año. ¿Cómo explicar tal cantidad de desecho?

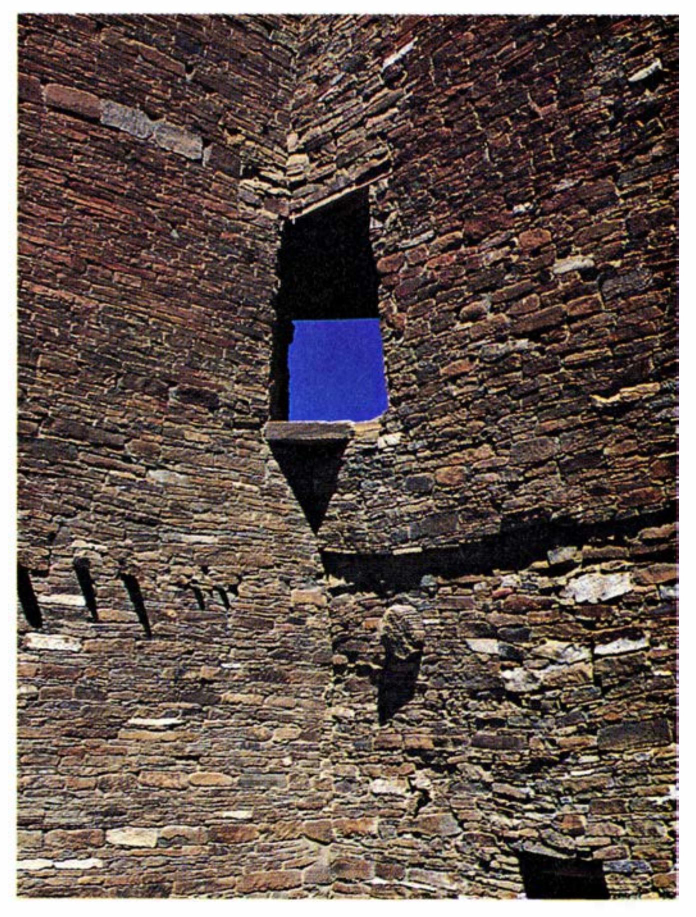
El montículo de basura nos proporciona pistas interesantes en torno a las actividades desarrolladas en Chaco. La basura da la impresión de estar estratificada en los montículos, como si se hubiese depositado a intervalos, y no a diario. No todas las Casas Grandes tienen montículos de desperdicios, lo que significa que no eran esenciales o indicativas para la vida cotidiana. Las casas que sí poseen montículos muestran una discrepancia similar entre el número de objetos y el tamaño de la población residente. Ello nos induce a concluir que los montículos reflejan una actividad humana que no guarda relación con la ocupación diaria. ¿Pudieron haberlos creado concentraciones estacionales de una gran cantidad de gente, reunida en Chaco por razones ceremoniales? Tras ese origen, se habrían convertido en hitos importantes del paisaje y recuerdos visibles de acontecimientos ceremoniales de tiempos pasados.

Los caminos que de las Casas Grandes arrancan en una disposición radial corroboran, de manera convincente, que Chaco no constituía ninguna comunidad aislada, sino que se hallaba físicamente unida con las lejanas poblaciones anasazi. Esos caminos los descubrieron los navajo, quienes, a comienzos del siglo XX, señalaron la existencia de huellas indicativas de los mismos en áreas remotas de la cuenca del San Juan. Pero no se estudiaron debidamente hasta que se contó con las



11. GRAN KIVA de Chetro Ketl, una de las mayores del Chaco. Se trata de una estructura maciza con una pared de un metro de ancho. En el suelo, cuatro agujeros reforzados con mampostería contenían los soportes de un enorme tejado de madera; en el centro había un fogón cuadrado. A intervalos regulares alrededor de la circunferencia observamos nichos, de unos 30 centímetros cuadrados aproximadamente, cuya función era muy probablemente ceremonial.

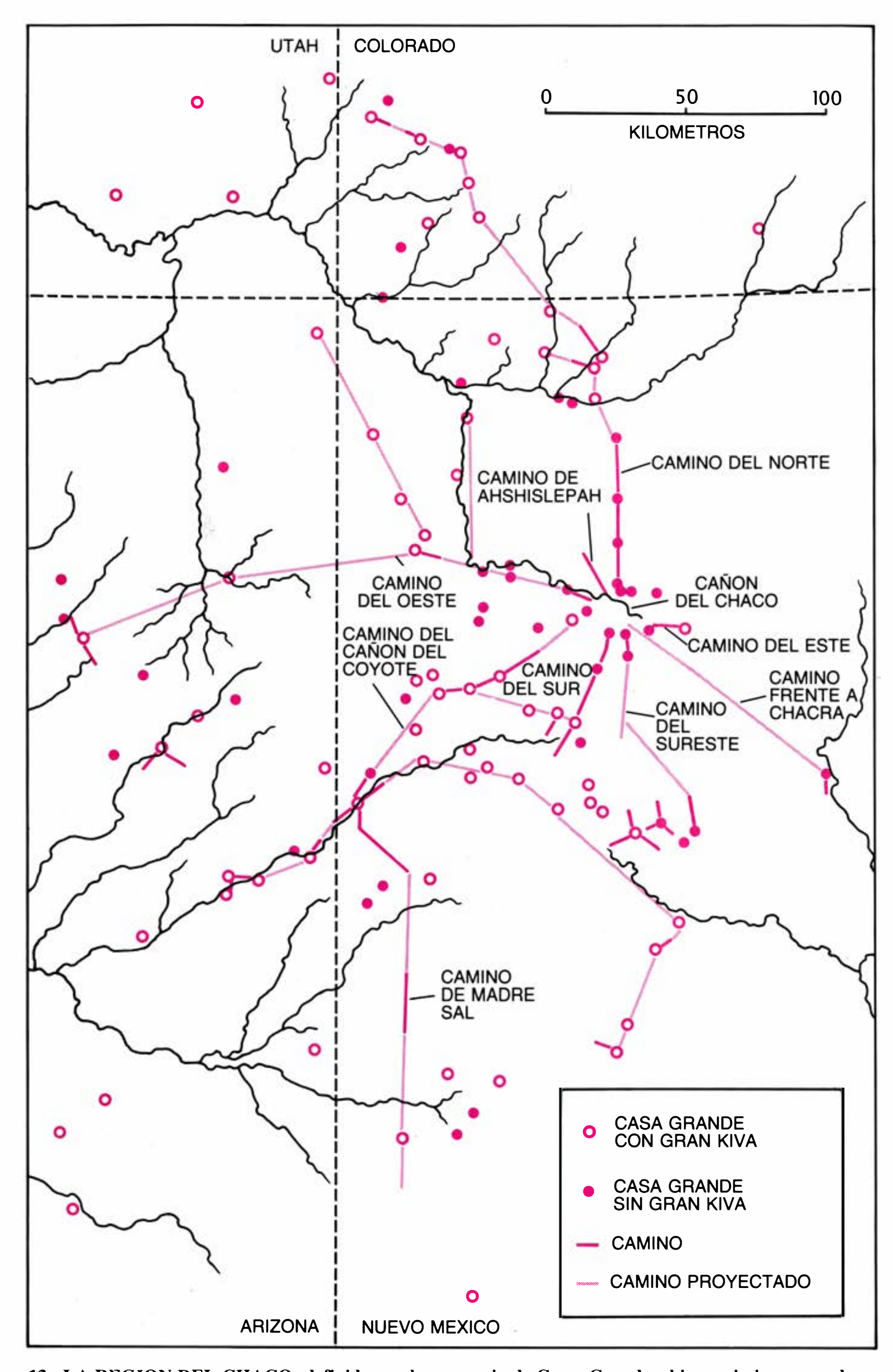




12. LAS PUERTAS son estructuras distintivas de las Casas Grandes. Las había en forma de T (*izquierda*) de varias dimensiones. Esta, correspondiente a Pueblo Bonito, posee una anchura insólita; su función nos es desconocida. Quizás el tipo T hiciera más fácil el transporte de una gran carga a través de las puertas. Las esquinadas, como la de Pueblo Arroyo (*derecha*), eran menos frecuentes; tal vez facilitaran el movimiento a través del laberinto de almacenes.

técnicas de detección remota, en la década de los 70.

En 1981 la Oficina de Administración Territorial comenzó el estudio sistemático de los caminos del Gran Norte, Ahshislepah, Sur y el cañón del Coyote, las principales vías conocidas para atravesar la vasta extensión de tierras de dominio público que rodea el cañón del Chaco. Creíase, por aquel entonces, que los caminos, de un trazado rectilíneo preciso (el camino del Gran Norte, por ejemplo, sigue una exacta orientación hacia el norte verdadero durante casi 50 kilómetros), eran simples pistas que había abierto el uso prolongado. Conforme avanzaba el estudio, sin embargo, se hacía evidente que los caminos habíanse construido de acuerdo con un proyecto cuidadoso: se había excavado la infraestructura por debajo del firme, especialmente en áreas de topografía irregular, y los caminos estaban flanqueados por montículos lineales de tierra llamados bermas. La anchura de los caminos varía en algunos lugares, haciéndose más amplios en las proximidades de las Casas Grandes, pero durante largas distancias tienen un ancho permanente de nueve metros. En las caras acantiladas del cañón del Chaco se tallaron amplias escalinatas y en distintos puntos de los acantilados se colocaron rampas de madera y andamiajes para facilitar la entrada y la salida del cañón.

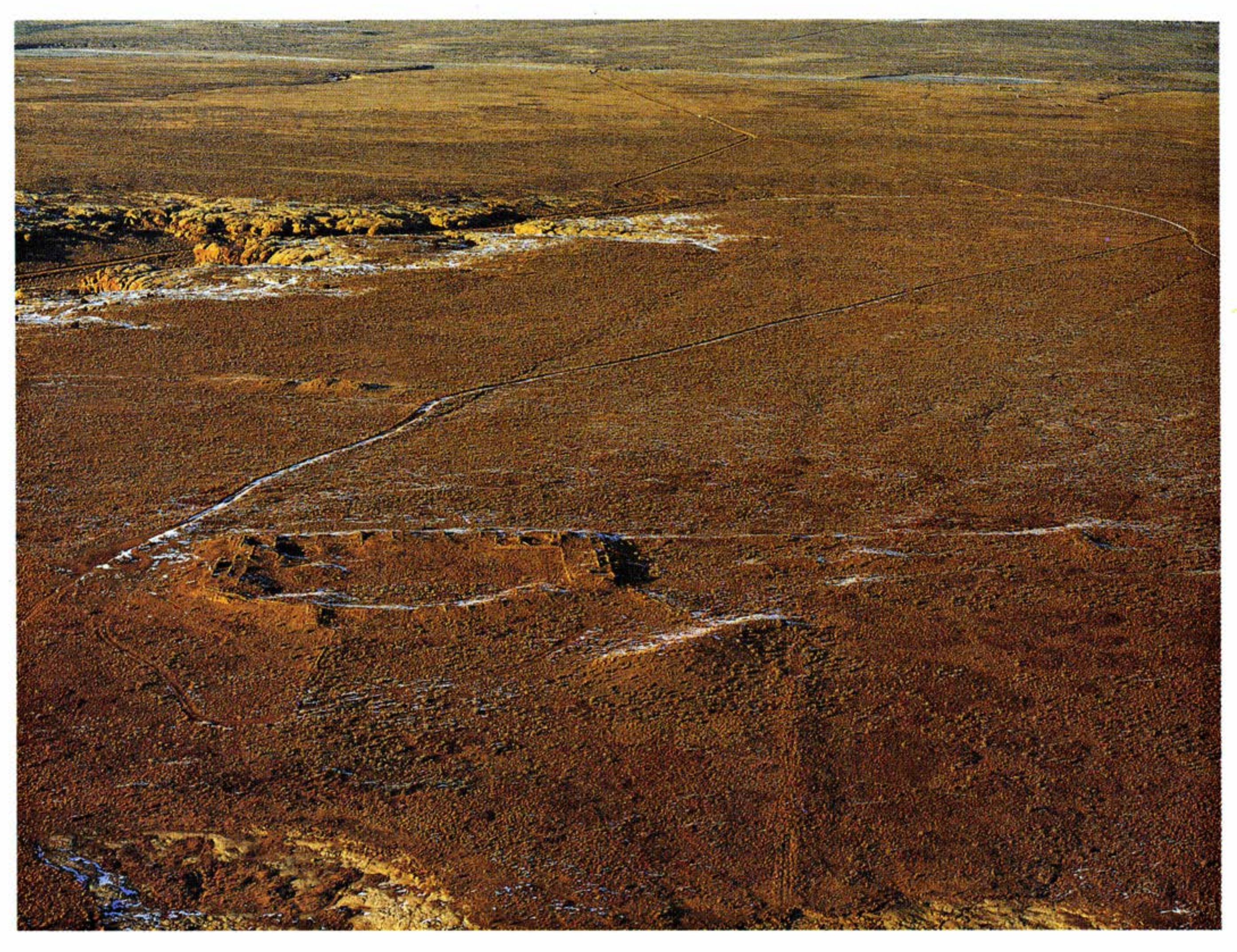


13. LA REGION DEL CHACO, definida por la presencia de Casas Grandes, kivas asimismo grandes y caminos, abarca el noroeste de Nuevo Mexico y parte de los estados de Colorado, Utah y Arizona, siendo mucho más extensa de lo que se venía creyendo hasta ahora. Aunque no se ha logrado cartografiar todavía la red viaria entera, los autores están ampliando hacia esa superficie su campo de investigación.

Estamos empezando a entender el alcance de los caminos que trascienden la cuenca del San Juan. Estudios en curso de Jon R. Roney, de la Oficina de Administración Territorial, Michael P. Marshall, del Proyecto Solsticio, Andrew P. Fowler, del Programa Arqueológico Zuni, y de nosotros mismos sugieren que las vías llegarían, por el norte, hasta el campo de San Juan, en las montañas Rocosas, y por el sur hasta las montañas Mogollón. Menos seguros estamos de su prolongación hacia el este y el oeste; quizá se extenderían, por el este, hasta las minas de turquesa próximas a Santa Fe y, por el oeste, hasta el valle del Pequeño Colorado, o incluso hasta las puntas de San Francisco, cerca de Flagstaff.

¿Cuál pudo haber sido la función de tales caminos? A nuestro entender, definen el cañón del Chaco como un centro ceremonial y como núcleo de una amplia red regional. La probabilidad de que Chaco fuera un centro ceremonial es verosímil. En el interior de los muros de algunas Casas Grandes, de las mayores, hallamos kivas imponentes, llamativos elementos de la arquitectura de Chaco. En Chaco, se han encontrado, al menos, 18; dos de las cuales fueron excavadas en Pueblo Bonito. Estas estructuras subterráneas, cuyas paredes son de albañilería, duplican las proporciones de otras kivas de Chaco: tienen por término medio desde 15 metros hasta más de 20 de diámetro y se hunden hasta cuatro metros de profundidad. En la parte inferior de cada una hay agujeros recubiertos con obra de albañilería que en otro tiempo sujetaron los soportes del pesado tejado; uno de los soportes de madera hallados en Chetro Ketl medía 68 centímetros de diámetro, una pesada carga para ser transportada desde 40 kilómetros o más de distancia. A lo largo de los muros de las kivas observamos nichos, en intervalos regulares, de función desconocida, aunque cabe presumirles un interés ceremonial.

La certeza de que el cañón del Chaco constituía el centro de un extenso sis-



14. PUEBLO ALTO está situado por encima del cañón del Chaco en la mesa norte, desde donde domina una vista panorámica de la circundante cuenca del San Juan. Desde el aire tan sólo se divisa un contorno impreciso, en parte por la erosión sufrida y, en parte, porque una buena porción del yacimiento se ha recubierto para evitar su destrucción. Los restos de cuatro caminos que parten hacia el norte desde Pueblo Alto son débilmente visibles (en contraste con las carreteras modernas que se distinguen). El sistema de caminos obedecía a una planificación rigurosa: un trazado rectísimo y nueve metros de ancho.

tema regional se apoya en los tipos de objetos recuperados allí. Artículos exóticos, entre los que aparece turquesa de la región de Santa Fe, a 160 kilómetros al este, conchas ornamentales de la costa del Pacífico y campanas de cobre y plumas de ararauna procedentes de México, abundan en el cañón del Chaco más que en cualquier otro yacimiento anasazi contemporáneo. Aún más destacable es la cantidad de bienes de consumo que fueron importados al cañón desde el exterior. Hasta un tercio de los detritos de las lascas de piedra hallados en Pueblo Alto procedían de canteras lejanas, como las del paso de Washington en las montañas de Chuska, a unos 80 kilómetros de distancia. La mitad aproximada de los miles de cacharros de cocina descubiertos está fabricada con una arcilla especial que se ha demostrado procedente de la región de Chuska.

Hace casi un siglo, se descubrieron estructuras similares a las Casas Grandes del cañón del Chaco a cierta distancia del propio Cañón. Así, el asentamiento de Ruina Azteca, que recuerda a Chetro Ketl en tamaño y disposición, fue descubierto a 85 kilómetros al norte de Chaco y excavado en las décadas de 1910 y 1920. Posteriormente se ha venido notificando la existencia de otros yacimientos de las características del Chaco. En los años setenta, el número de las Casas Grandes fuera del cañón había ascendido a más de veinte, la mayoría erosionadas gravemente por las fuerzas de la naturaleza y reducidas a montículos de escombros. Tras una década de trabajo de campo, la lista de posibles casas fuera del cañón ha aumentado a más de 150 y abarca una área de 150.000 a 300.000 kilómetros cuadrados.

En nuestra opinión, durante los siglos XI y XII esta superficie formaba parte del sistema regional de Chaco. Para afirmarlo nos basamos en la arquitectura similar de esas edificaciones, levantadas fuera del cañón, a la propia de las Casas Grandes de Chaco y en que muchas de ellas están unidas a Chaco mediante un complejo sistema de caminos. El sistema de Chaco, venimos en concluir, multiplica por ocho o diez veces la extensión que le suponíamos en un comienzo. Asimismo, la escala de nuestros estudios se ha agrandado de forma irreversible.

Antes del descubrimiento de las Casas Grandes y los caminos que trascendían la cuenca del San Juan, pensábamos que la evolución del sistema regional de Chaco podía recibir completa explicación atendiendo sólo a las condiciones ecológicas locales. Sabíamos que durante los siglos XI y XII la cuenca era un desolado y deshabitado desierto y que el sistema de caminos se adentraba muchos kilómetros a través de un territorio no ocupado por los anasazi. Esas vías alcanzaban el borde de la cuenca, donde la lluvia más abundante

y suelos más fértiles animaban asentamientos densamente poblados. Sabíamos también por el estudio de los anillos de los árboles que cada año la cantidad de lluvia caída variaba considerablemente dentro de la propia cuenca y que un buen año agrícola en un punto (con producción de excedente alimentario) podía ser un mal año (con hambruna incluida) en cualquier otro. Formulamos así la hipótesis según la cual el cañón del Chaco constituía un lugar central de almacenamiento para toda la cuenca del San Juan. El excedente alimentario de la cuenca se transportaba hasta las Casas Grandes, donde se almacenaba y dispensaba de acuerdo con las necesidades de las comunidades afectadas por la sequía. En tal contexto, las estancias-departamentos, las estancias comunicadas por una calle y los montículos de basura estratificada adquieren pleno sentido.

Ahora, dado el espectacular aumento de la escala del sistema de Chaco, tenemos que reevaluar nuestra hipótesis. Aunque estamos seguros de que el cañón del Chaco difería de las aisladas comunidades protourbanas con las que a menudo se le ha puesto en relación, estamos menos seguros sobre la forma en que se comunica con el mundo allende la cuenca del San Juan. Sabemos que fue el corazón de un amplio sistema regional y una comunidad de complejidad sin precedentes; tenemos también razones para creer que fue mucho más que un centro comunal para la cuenca del San Juan. Pero, exactamente, ¿cuán extenso fue el sistema del Chaco? Nadie puede responder con absoluta certeza. Pero es obvio que el cuadro emergido revela que nos hallamos en el umbral de una nueva generación de estudios que acabarán por descifrar el "fenómeno del Chaco".

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE ARCHITECTURE OF PUEBLO BONITO. Njeil M. Judd. *Smithsonian Miscelaneous Collections*, vol. 147, n.º 1, Publicación 4524; 1964.

GREAT PUEBLO ARCHITECTURE OF CHACO CANYON, NEW MEXICO. Stephen H. Lekson. *Publications in Archaeology 18B, Chaco Canyon Studies*. National Park Service, Division of Cultural Research, P.O. Box 26176, Alburquerque, N. M., 1984.

PEOPLE OF CHACO: A CANYON AND ITS CULTURE. Kendrick Frazier. W. W. Norton and Company, Inc., 1986.

ARCHAEOLOGICAL SURVEYS OF CHACO CANYON. Alden C. Hayes, David M. Brugge y W. James Judge. University of New Mexico Press, 1987.

Taller y laboratorio

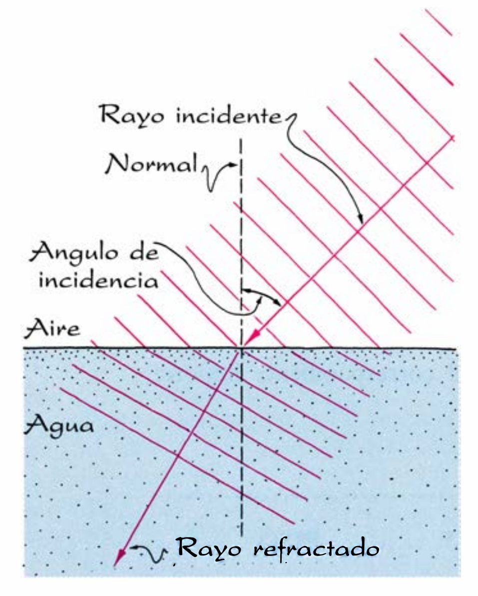
Las sombras proyectadas en el fondo de un charco no son como las otras. ¿Por qué?

Jearl Walker

La explicación de la mayoría de las sombras no ofrece especial dificultad, pero las que se proyectan en el fondo de los charcos de agua presentan extrañas peculiaridades. Así, cuando una hoja vegetal flota sobre el agua, su sombra se muestra tal cual si la profundidad del agua es de uno o dos centímetros, pero si esa profundidad es algo mayor, la sombra exhibe un singular borde luminoso. Igualmente insólitas son las sombras fugaces que quedan en el fondo de un charco somero cuando por el agua se pasea rápidamente un objeto y luego se retira: sin que nada opaco quede en el agua, en el fondo bailan unos discos oscuros con los bordes luminosos. Un lápiz puede también producir sombras inesperadas. Introdúzcase un lápiz parcialmente en el agua e inclínese en distintas direcciones. Se verá así que, para muchas orientaciones, la sombra consta de dos formas, que recuerdan sendas salchichas, separadas por una banda de luz.

Los aspectos desconcertantes de estas sombras se deben a la luz que se refracta en la separación aire-agua; es decir, su dirección de propagación cambia porque cambia su velocidad. En el vacío, la luz viaja a 3×10^8 metros por segundo, que es la velocidad máxima que puede darse en el universo. En el aire su velocidad es un poco menor, porque de vez en cuando interactúa con moléculas de aire que se interponen en su camino. En el agua, donde se refrena por interacción con unas moléculas apiñadas mucho más densamente, viaja a sólo tres cuartos de su velocidad en el vacío.

Los libros de texto suponen la luz constituida por una onda formada por una sucesión de frentes de onda planos; y representan la dirección de propagación por un rayo perpendicular a estos últimos. Cuando la luz se refracta en la frontera entre dos medios, el rayo inicial recibe el nombre de rayo incidente y el rayo final, el de rayo refractado. La orientación del rayo incidente se mide con respecto a una recta, llamada normal, que es perpendicular a la frontera. Si ésta es curva, la normal es la perpendicular a la tangente a la frontera en el punto por donde la cruza el rayo. El ángulo entre la normal y el rayo incidente se denomina ángulo de incidencia.



1. Refracción

Si la luz, viajando por el aire, llega a un charco de agua plano y se propaga paralelamente a la normal, cada frente de onda aminorará su velocidad uniformemente al cruzar la frontera; por cuyo motivo no cambiará su dirección de propagación. Para toda otra orientación del rayo incidente, cada frente de onda atravesará la frontera gradualmente. Así, la parte que penetre primero en el agua decelerará antes que el resto del frente. Esta reducción no uniforme de la velocidad produce en el frente una suerte de acodamiento que lo abarca por entero y altera la dirección en que viaja; así es como se refracta la luz. Cuanto mayor es el ángulo de incidencia, más se refracta la luz.

Cuando la superficie del agua está plana, el haz de rayos paralelos se refractará por igual y todos los rayos luminosos iluminarán el fondo del charco uniformemente. Pero si la superficie del agua es curva, la refracción no será igual. Los rayos poseerán entonces ángulos de incidencia diferentes, pues las normales ofrecerán una orientación diversa en los distintos puntos por donde los rayos penetren en el agua. La refracción no uniforme producirá una iluminación no uniforme en el fondo del charco.

Con una superficie cóncava, los rayos divergirán tras refractarse; decrecerá, por tanto, la iluminación en la zona del fondo a la que de otro modo hubieran ido a parar los rayos. Si la superficie es convexa, los rayos convergirán tras refractarse; la zona donde se crucen, y donde la luz será más intensa, recibe el nombre de cáustica. Según sea la forma de la superficie del agua, la cáustica puede ser un punto, una línea o una "superficie" tridimensional. Si se da la circunstancia de que el fondo del charco corte la cáustica, en el fondo veremos un punto o una línea luminosos. Si el fondo corta los rayos antes o después de que se crucen, aparecerá también más o menos iluminado, pero no tan intensamente como si cortara la cáustica.

Cuando se forman leves ondulaciones en la superficie del agua, éstas interponen unas superficies curvas que arrojan al fondo unas figuras de luz fugaces y complejas, y cuyo movimiento resultará demasiado rápido para poder seguirlo. Un procedimiento mejor para estudiar la refracción en una superficie de agua curva es poner a flotar en ella un pequeño objeto cuyos bordes confieran a la superficie una forma cóncava o convexa. Si el borde del objeto queda un poco más alto que el nivel normal del agua, ésta ascenderá por el borde formando una superficie cóncava; si el borde queda un poco más bajo, el agua se combará hacia abajo creando una superficie convexa.

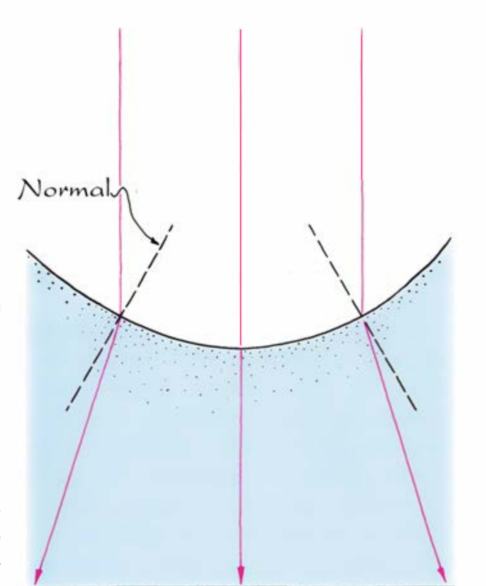
En 1983, Michael V. Berry y J. V. Hajnal, de la Universidad de Bristol, describieron de qué modo influían en la

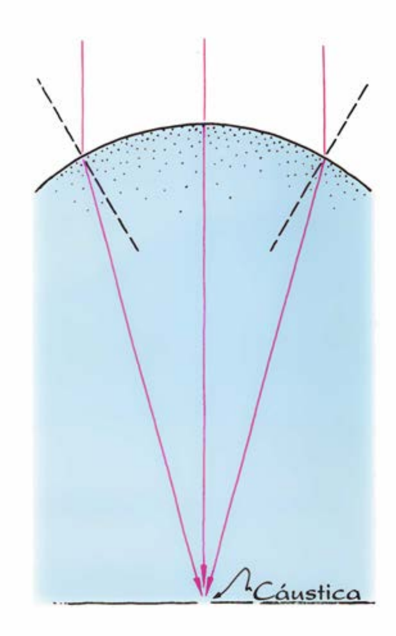
sombra de un objeto flotante las superficies curvas del agua que lo rodea. Para repetir sus experimentos, llénese parcialmente de agua un recipiente blanco. Luego, con suavidad, deposítese sobre el agua una cuchilla de afeitar (pero no de las que tienen un filo reforzado más grueso). Si se tiene cuidado en que la cuchilla se mantenga horizontal sin que se rompa la superficie, aquélla flotará. El peso de la cuchilla actuará sobre el agua situada debajo y provocará que su nivel descienda por debajo del normal, con lo que la superficie del agua que ciña los cantos de la hoja será convexa.

Ilumínese ahora la cuchilla y el agua con una lámpara suspendida al menos a una distancia de un metro y examínese la sombra que arroje la cuchilla sobre el fondo del recipiente. Si la profundidad del agua no alcanza unos tres centímetros, se producirá una sombra normal; se tratará, pues, de una transposición oscura del contorno de la cuchilla. Pero si el agua es más profunda, la sombra presentará bordes brillantes. Berry y Hajnal describen el tránsito de un tipo de sombra al otro. El agua llegará hasta los cinco centímetros de altura; se colocará luego una hoja de papel blanco en el fondo del recipiente; entonces, la sombra de la cuchilla presentará unos bordes brillantes. Si se elevara el papel hasta que se encontrara a uno o dos centímetros de la cuchilla, la sombra se tornaría normal. Personalmente prefiero hacer variar la profundidad de la sombra añadiendo o retirando agua del recipiente. Cuando en éste se vierte agua, la cuchilla no suele perturbarse; para extraer agua, puede emplearse una paja de tomar refrescos, tal como hago yo.

En la superficie de agua curva que rodee al contorno de la cuchilla, los rayos se refractarán de modo que converjan, pero su punto focal será función del punto por donde atraviesen la superficie [*véase la figura 3*]. La curvatura de la superficie será máxima junto a la cuchilla, por lo que los rayos que penetren en el agua por esa zona convergirán antes que los rayos que penetren en el agua más lejos del borde. Los rayos que atraviesen la superficie casi plana contigua no convergirán en absoluto.

Todo rayo que penetra en el agua exactamente por el borde recibe el nombre de rayo de sombra; si no estuviera el agua, esos rayos conformarían el contorno de la sombra. Consideremos otro rayo que se encuentre sólo un poco más separado del canto de la cuchilla que un rayo de sombra. La



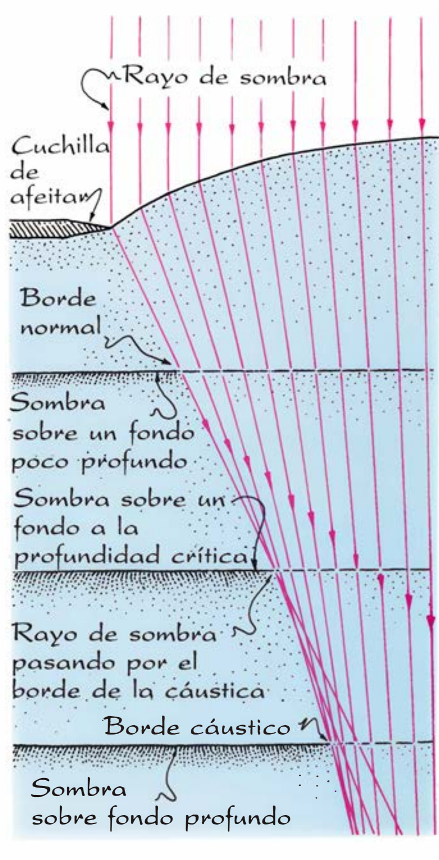


*2. Divergencia (**izquierda**) y convergencia (**derecha**) de rayos refractados*

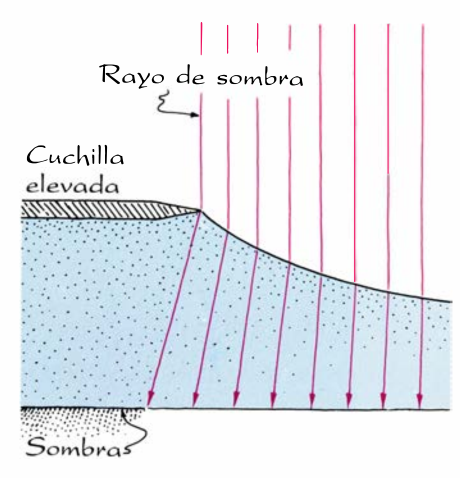
superficie curva del agua enfocará ese rayo y el de sombra, de manera que formen una cáustica a cierta profundidad por debajo del nivel de agua normal. Profundidad que denominaremos crítica. (En la ilustración, el fondo del recipiente se representa a tres profundidades, siendo crítica la central.)

Supongamos que hayamos comenzado con unos dos centímetros de agua en el recipiente. Esta profundidad es inferior a la crítica (que en mis experimentos es de unos tres centímetros). El fondo del recipiente cortará el rayo de sombra y el inmediato antes de que se crucen. La sombra de la cuchilla será normal y el rayo de sombra demarcará su límite. Añadamos poco a poco agua, sin dejar de atender a la sombra. Cuando el agua llegue a la profundidad crítica, en el borde de la sombra aparecerá una cáustica porque entonces ese borde estará en el punto focal del rayo de sombra y su inmediato.

Añadamos más agua. Veremos que el borde de la sombra seguirá exhibiendo una cáustica, aunque no producida ya por un rayo de sombra y su inmediato, sino por otros dos rayos contiguos que atravesarán la superficie del agua algo más lejos de la cuchilla. Por ser la curvatura, en ese lugar, menor que junto al borde de la cuchilla, los rayos se hallarán enfocados a mayor profundidad que el rayo de sombra y su inmediato. El rayo de sombra no rozará ya el borde de la sombra, sino que irá a la zona iluminada del fondo del recipiente, a cierta distancia de la sombra. La anchura de ésta no la delimitarán los rayos de sombra, como en una sombra normal, sino la cáustica que invadirá la sombra. Si siguiéramos añadiendo agua, la posición de la pareja de rayos responsable de la cáustica del borde de la sombra se iría alejando gradualmente del borde de la cuchilla. Si aumentáramos la distancia al fondo del recipiente, encontraríamos la cáustica en el punto de convergencia de los rayos que atravesarían la superficie del agua por donde la misma fuera menos curva.



3. Sombra de una cuchilla de afeitar flotante

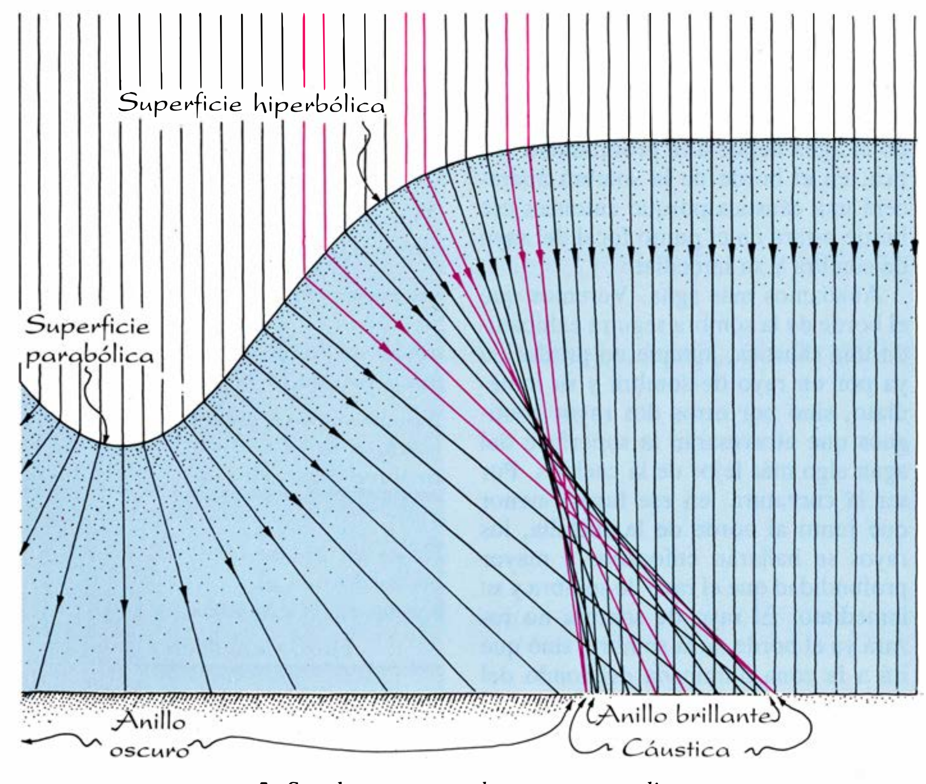


4. Sombra de una cuchilla elevada

En teoría, la profundidad crítica depende del peso de la cuchilla. Cuanto mayor sea éste, más se comprimirá el agua y más aumentará la curvatura de ésta. Entonces, cada rayo de sombra y su inmediato se cortarán antes; o sea, la profundidad crítica será menor. En un experimento que ideé para comprobar esta teoría, extraje agua hasta dejar una profundidad de 2,5 centímetros y puse a flotar una sola cuchilla. Esta produjo una sombra normal. Luego formé una pila de tres cuchillas y la coloqué sobre el agua. Aunque esta pila flotó únicamente durante algunos segundos, me fue posible estudiar su efímera sombra, cuyo contorno brillaba. Evidentemente, el peso de la pila de cuchillas hacía descender el nivel del agua más que la cuchilla sola, disminuyendo la profundidad crítica, por lo que el borde de la sombra aparecía iluminado por la cáustica. Esta se mostraba más ancha que las que había observado con una cuchilla. Cuando el agua se infiltraba en la pila de cuchillas, se hundían las dos inferiores y la de arriba se quedaba flotando.

Señalaron Berry y Hajnal que hojas vegetales, insectos y otros objetos flotantes de muy diversa índole crean sombras de bordes brillantes si el agua tiene una profundidad suficiente y los objetos oprimen la superficie del agua. Por contra, cuando los objetos flotantes elevan la superficie del agua haciéndola cóncava, las sombras presentan unos bordes normales porque los rayos de luz divergen y no forman cáustica. Además, estas sombras tienen un tamaño diferente. Una cuchilla de afeitar produce una sombra que es mayor que la hoja. Pero si izamos la cuchilla de modo que produzca una superficie cóncava, su sombra será menor que la hoja porque los rayos, como divergen, pasan por debajo de la cuchilla y reducen la sombra [*véase la figura 4*].

Berry y Hajnal mostraron asimismo la formación de cáusticas en los remolinos de agua. Para ello crearon un remolino haciendo girar un imán debajo del recipiente, imán que a su vez hacía girar otro imán recto inmerso en el agua junto al fondo del recipiente. Cuando la luz procedente de una fuente suspendida atravesaba los costados curvos del remolino, la refracción formaba un ancho anillo brillante que rodeaba una zona interior oscura. Los bordes interno y externo de aquel anillo eran cáusticas.



5. Sombra proyectada por un remolino

Hace unos meses, M. H. Sterling, Michael A. Gorman, P. J. William, S. C. Coffman y Robert M. Kiehn, de la Universidad de Houston, y John A. Strozier, Jr., del Empire State College, describieron cómo crear unas sombras similares en remolinos, pero sin dispositivos complicados. El lector podrá repetir sus observaciones la próxima vez que tome un baño. Tras esperar a que el agua se encalme, hay que remover vigorosamente un objeto por la capa superficial del líquido y luego retirarlo. Durante algunos segundos se verán círculos oscuros, dotados de bordes luminosos, bailando en el fondo de la bañera. El borde en cuestión es una versión más estrecha del anillo brillante observado por Berry y Hajnal. El lector puede probar con varios objetos para descubrir cuál es el que genera los mejores torbellinos. Sterling y sus colaboradores emplearon una paleta circular. Cuando ésta se movía, el agua circulaba desde su parte frontal, rodeando los cantos, para llenar el espacio que quedaba en el reverso. Los pequeños remolinos que se mostraban a la vista en la superficie del agua estaban enlazados mediante un tubo de remolino que se movía por debajo de la superficie.

Las investigaciones de este grupo fueron provocadas por una observación que hizo Kiehn en una piscina al aire libre. Al salir del agua, dejó en el fondo de la piscina dos discos oscuros rodeados por un anillo luminoso estrecho. Aquellas sombras persistían durante unos 10 minutos. Kiehn las atribuyó a la refracción de la luz en los remolinos que había dejado en el agua. Pero, ¿a qué tipo exacto de remolino achacarlas?

El equipo abordó el estudio de remolinos de dos formas, una cóncava (parabólica) y la otra convexa (hiperbólica). Si los remolinos fuesen completamente parabólicos, los rayos de luz divergerían: la zona situada bajo un remolino aparecería tan pálida que se diría oscura. Pero la divergencia no puede crear un anillo brillante. Si los remolinos fuesen completamente hiperbólicos, los rayos de luz se enfocarían y crearían un anillo brillante; ahora bien, las superficies del agua se en-

contrarían formando un ángulo muy agudo en el centro del remolino, situación ésta físicamente inverosímil. El grupo descubrió que el mejor modelo de remolino sería una combinación de ambas formas: un centro, o núcleo, parabólico rodeado de una superficie parabólica.

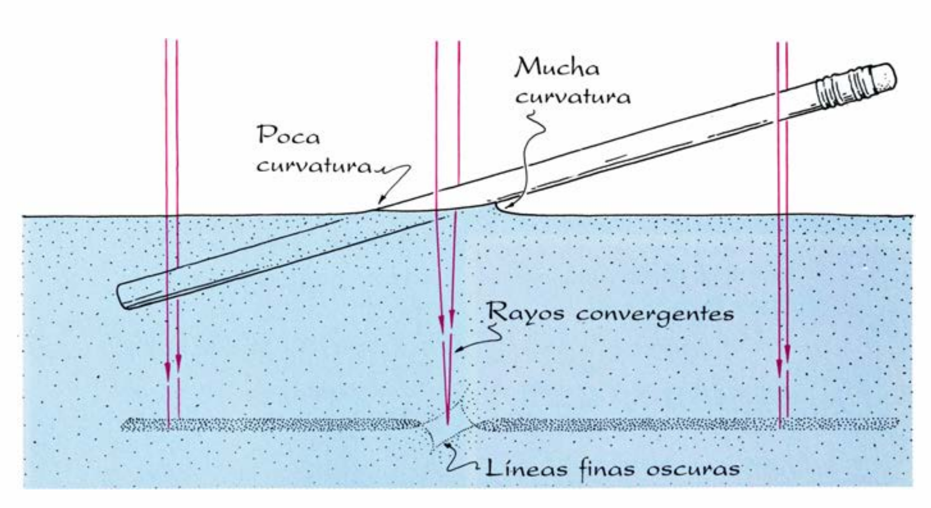
El núcleo crea el disco oscuro de la sombra, mientras que el anillo brillante que rodea al disco se debe a rayos muy cercanos unos a otros que atraviesan la superficie hiperbólica y se enfocan en el fondo. Los rayos que atraviesan la superficie hiperbólica cerca del núcleo convergen demasiado pronto para contribuir a la formación del anillo y acaban desparramados por la zona iluminada exterior. Los rayos que atraviesan la superficie lejos del núcleo, sin posibilidad de converger, van a parar también al exterior del anillo.

Qué rayos sean responsables de la cáustica dependerá de la profundidad del agua. Si el remolino avanza por agua de profundidad decreciente, la responsabilidad de la cáustica se trasladará a los rayos cercanos al núcleo; el disco oscuro se contraerá hasta adquirir cierto tamaño mínimo y luego desaparecerá si la profundidad del agua decreciera todavía más. Si el remolino se mueve por agua que aumente de profundidad, el disco se ensanchará. El anillo crecerá entonces hasta dejar ver sus bordes cáusticos.

He descubierto cómo conseguir sombras similares en el fondo de un recipiente de agua soplando con una paja. Se forma así un hoyuelo en la superficie que habitualmente proyecta una sombra circular con un anillo brillante. Si soplamos casi horizontalmente, las sombras engendran unas intrigantes distorsiones.

La divergencia de los rayos cuando pasan por una superficie de agua cóncava responde del extraño aspecto que ofrece la sombra de un lápiz introducido en el agua. De este efecto informó, en 1967, Cyrus Adler, de Nueva York, quien lo descubrió mientras se distraía con un lápiz en el baño. El lápiz, cuenta, proyectaba sobre el fondo de la bañera una sombra, curiosamente dividida, bajo la iluminación de la única lámpara que había en el cuarto de baño. Se producía lo que dio en llamar "efecto de la sombra-salchicha"; explicó, correctamente, que el intersticio iluminado entre las dos salchichas debíase a la superficie cóncava que el agua formaba en torno al lápiz.

Intrigado por la observación de Adler, he estado jugando con un lápiz y



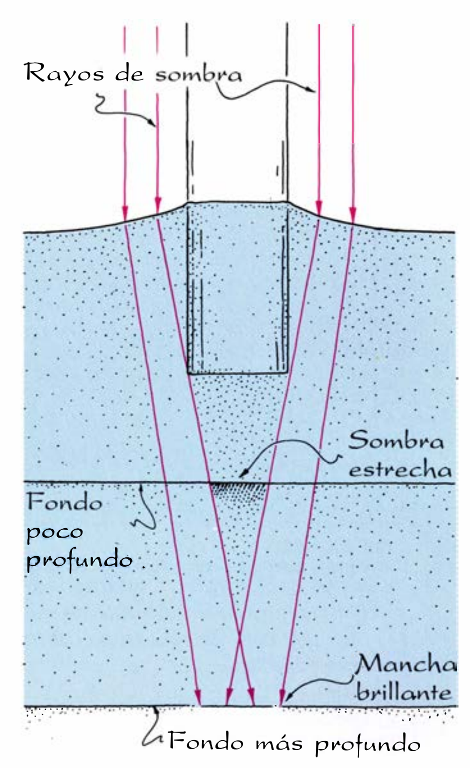
6. *"Efecto de la sombra-salchicha"*

un recipiente con agua. Para seguir mi recreación, llene el lector un recipiente con agua hasta unos seis centímetros de altura, colóquelo directamente debajo de una luz e introduzca verticalmente en el agua un lápiz romo. Al principio quizá se observe una sombra grande con un borde brillante, pues el lápiz oprime inicialmente la superficie del agua. Espere a que el agua ascienda por el cilindro, o bien tire del lápiz levemente hacia arriba para que el agua a él adherida adopte una forma cóncava. Fíjese el lector en los rayos que atraviesan la superficie del agua por uno de los costados del lápiz. Estos rayos divergen en distintas direcciones; algunos son obstaculizados por el tramo sumergido del lápiz. El rayo que pasa rozando el extremo del lápiz es el rayo de sombra; los rayos que pasan por el costado opuesto del lápiz sufren una divergencia similar y poseen, asimismo, un rayo de sombra.

Si introducimos el lápiz varios centímetros en el agua, los dos rayos de sombra no se cruzarán antes de llegar al fondo del recipiente: se nos manifestará una sombra más estrecha que el lápiz. Alcemos gradualmente el lápiz. La sombra se irá estrechando hasta desaparecer y ser remplazada por una mancha brillante. Ha ocurrido que los rayos de sombra son interceptados por el fondo del recipiente. La mancha brillante se debe a los rayos que, procedentes de costados opuestos, se solapan antes de llegar al fondo del recipiente. Levantemos el lápiz un poco por encima del nivel plano del agua. Si el extremo del lápiz mantiene colgando un puente de agua con el resto de ésta, la mancha brillante se mantendrá. Pero si levantamos tanto el lápiz que no se forme puente, aparecerá una sombra normal.

Introdúzcase en ese momento el lápiz, inclinado 45 grados; vuélvase a esperar a que el agua suba por el cilindro, o bien elévese el lápiz un poco. La superficie del agua volverá a ser cóncava en torno al lápiz, pero entonces el grado de curvatura será variable alrededor de los costados del lápiz [*véase la figura 6*]. La curvatura será máxima donde el lápiz forma un ángulo de 45 grados con el agua, mínima en el ángulo obtuso situado en el costado opuesto al anterior e intermedia en los demás puntos del contorno que crea el agua en su contacto con el lápiz.

Ambas partes del lápiz, la seca y la



7. *Sombra de un lápiz vertical*

sumergida, arrojan sombras normales; no así el corto trecho del mismo que está rodeado de una superficie curva de agua. Consideremos los rayos de sombra que atraviesan las dos zonas de curvatura intermedia, situadas en sendos costados opuestos del lápiz. Estos rayos convergen hacia la zona del fondo comprendida entre las sombras que proyectan las partes seca y sumergida del lápiz. Si el agua es somera, los rayos de sombra quedarán interceptados por el fondo antes de que se crucen y entonces se verá una sombra estrecha que conecta las dos sombras más anchas. Si el agua fuese más profunda, los rayos de sombra se cruzarán y desaparecerá la sombra de conexión. Entre las dos sombras se verá un intersticio luminoso.

Adler advirtió que el intersticio entre las dos sombras posee una compleja estructura de regiones claras y oscuras; así, las contiguas a las sombras brillaban más que el interior del intersticio, que era grisáceo. Yo llegué a observar dos líneas oscuras que parecían irradiar desde las puntas de las dos sombras, cual si se hubieran generado unas "anticáusticas".

Sobre el agua del depósito vertí una capa gruesa de aceite de maíz y atravesé ambos líquidos con un lápiz inclinado 45 grados. Entonces, la sombra del lápiz se mostró compuesta de tres partes separadas por intersticios luminosos. Uno se debía a la refracción en la superficie de separación entre el aire y el agua; el otro, a la refracción en la superficie de separación entre el agua y el aceite.

Podría ser interesante estudiar las sombras que arrojen otros objetos sobre el fondo de aguas someras. Por ejemplo, un cabello flotante crea una ristra de sombras diferentes: unas oscuras y otras con bordes brillantes. ¿Adivinaría el lector, observando la sombra, qué trechos del cabello están sumergidos y qué trechos se encuentran por encima del nivel del agua?

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SHADOW-SAUSAGE EFFECT. Cyrus Adler en *American Journal of Physics*, vol. 35, n.° 8, págs. 774-776; agosto, 1967.

THE SHADOWS OF FLOATING OBJECTS AND DISSIPATING VORTICES. M. V. Berry y J. V. Hajnal en *Optica Acta*, vol. 30, n.° 1, págs. 23-40; enero, 1983.

WHY ARE THESE DISKS DARK? THE OPTICS OF RANKINE VORTICES. M. H. Sterling, M. Gorman, P. J. Widmann, S. C. Coffman, J. Strozier y R. M. Kiehn en *Physics of Fluids*, vol. 30, n.° 11, págs. 3624-3626; noviembre, 1987.

Juegos de ordenador

De cómo buscar primos en la gravilla numérica

A. K. Dewdney

Ninguna recreación capta mejor el atractivo del número puro que la búsqueda de números primos que, a modo de pepitas de oro, se ocultan en la gravilla gris de los números corrientes. Un número primo es elemental: no puede dividirse exactamente por ningún número, salvo él mismo y la unidad. Su escasez les confiere carácter precioso. Aunque bastante corrientes entre los números pequeños, cerca de las fuentes del gran Río del Continuo, se van enrareciendo rápidamente en los bancales de aguas abajo.

Podemos pasar los números por una criba; podemos incluso construir una mesa de lavar números, que facilite su extracción; pero nadie sabe dónde se encuentran los primos sin antes repasar el lugar. No existe fórmula que los proporcione. Sí hay una especie de pauta o tendencia, una especie de rudimentaria geología, que ayuda a conjeturar dónde yacen los placeres. Lo mismo que los aficionados de todo plumaje que se lanzaron en bandadas sobre California y el Yukón para lavar las arenas de distantes cursos de agua, en busca del esquivo metal amarillo, así los lectores ordinarios podrán partir hacia el País del Número sin necesidad de otro mapa que este silabario, plegado en algún bolsillo desocupado.

Pocas ideas matemáticas le son tan accesibles al lego en la materia como la noción de número primo. Apenas se requiere un minuto para explicarle al hombre o mujer de la calle qué son los números primos. Invitémosles a café, y a poco que se les anime se pondrán a escribir los números primos en una servilleta de papel: 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, ... y así sucesivamente. El 1 no suele considerarse primo.

¿Podríamos distinguir un primo a simple vista? Si hubiera muchos números en el arel, ¿lanzarían los primos destellos amarillos a nuestros ojos? No faltan quienes así lo crean. No es raro que los números acabados en 1 sean preciosos, como el 11, el 31 y el 41. Mas conviene estar alerta y no tomar por oro todo lo que reluce: el 21 y el 81, por ejemplo, son pirita. Al cabo, los números acabados en 1 nos engañan cada vez con mayor frecuencia; tanta, que cabe preguntarse, como hicieron algunos antiguos griegos, si a base de irse enrareciendo no acabarán los primos por desaparecer del todo. ¿Se agotan? La primera demostración de que los números primos no tienen fin es legado de Euclides.

La demostración es tan simple que podemos imaginarnos a Euclides extrayéndola de un esclavo, a la manera socrática. Yo prefiero la conversación entre novato y veterano, en el ribazo del Río del Continuo:

NOVATO: ¡Señor! ¿Hasta qué cota del río quedan primos?

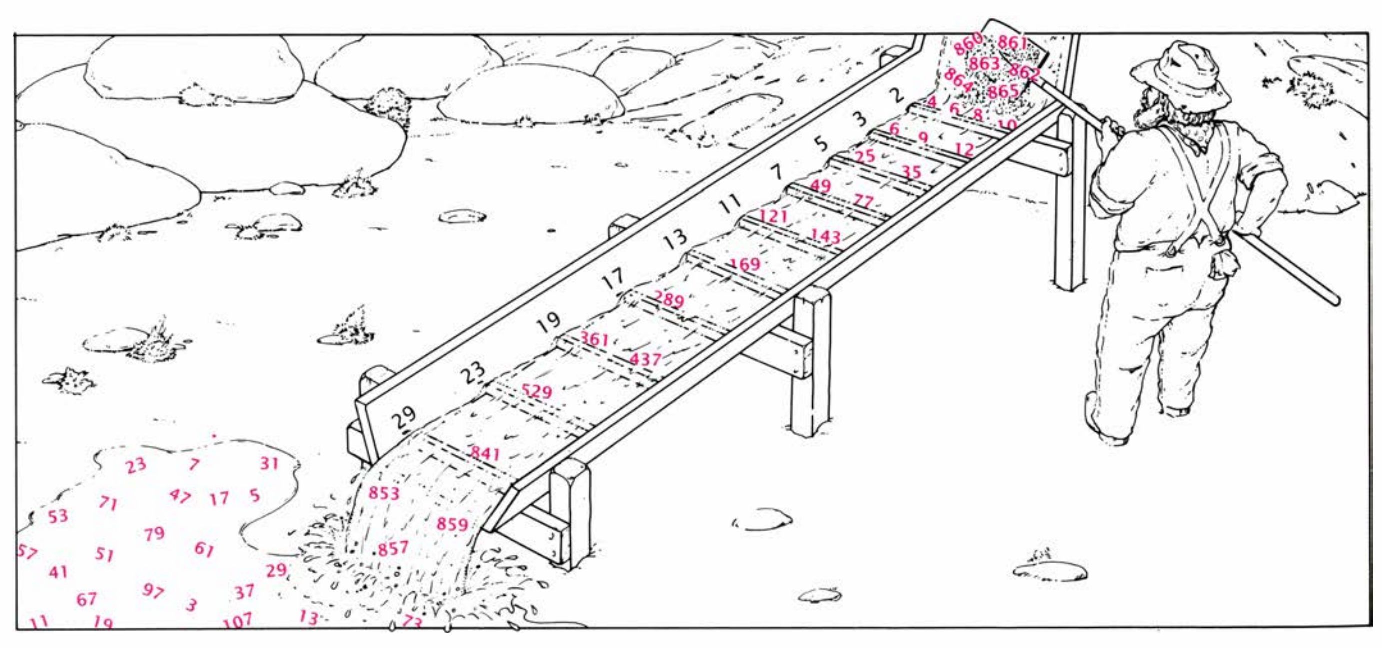
VETERANO: Pues verás, chico, van apareciendo hasta entrar en el Mar del Infinito.

NOVATO: No me lo creo. Andamos por los millones y no les hemos visto el pelo en todo el día.

VETERANO: A vosotros los pardillos hay que explicároslo todo. Mira, supón que hubieras llegado al último primo. Ya no habría más después, ¿verdad?

NOVATO: ¡Claro!

VETERANO: Llamémosle *n*. Ahora



1. Una mesa de lavado para separar números primos

vas y formas el producto de todos los primos que haya, hasta llegar a n. Es decir, vas y multiplicas $2 \times 3 \times 5 \times \ldots \times n$. Después le sumas 1 al producto y le llamas p al número obtenido.

NOVATO: ¡No me irá a decir que p es primo!

VETERANO: ¡Poco importa! Mira: p no es divisible por 2, porque al dividirlo entre 2 sobra 1; no es divisible por 3, pues también da resto 1. Siempre sobra 1 al dividir por cualquier número primo menor o igual que n.

NOVATO: ¿Y eso qué demuestra? A lo mejor es divisible por algún número comprendido entre n y p. Después de todo, p es mucho menor.

VETERANO: ¿Y ese divisor qué será, primo o compuesto?

NOVATO: No podrá ser primo, porque el último número primo es n.

VETERANO: Entonces será compuesto. Pero si es compuesto tendrá un divisor primo, que será también divisor de p. Y ese divisor primo no puede ser ni 2, ni 3, ni ninguno de los primos menores que n. Tendrá que ser mayor.

NOVATO: ¡Pues entonces p no podrá tener divisores!

VETERANO: Me da igual, porque entonces p sería primo. Ya ves, por muchos primos que encontremos yo sé que ha de haber otro mayor. Lo que no sé es cuál.

NOVATO: ¡Anda! Me imagino que eso es lo que le anima a seguir buscando.

VETERANO: Diana. Pero venga, deja de gimotear y al tajo. Ayúdame a mover el lavadero.

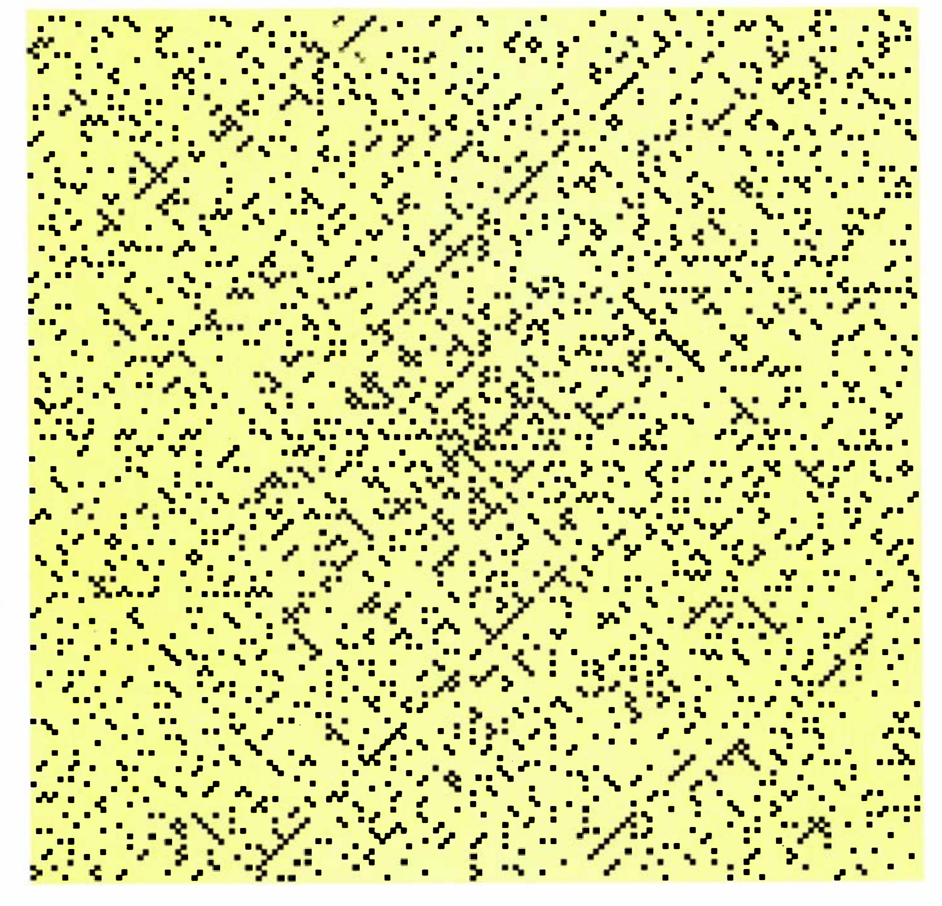
Aunque no haya un número primo mayor que todos los demás, sí existe, desde luego, un número primo que es el mayor de los conocidos. La diferencia entre una y otra cosa es causa de confusión de algunos lectores e incluso de algunos periodistas. El fallo estriba en titulares de última página como éstos: DESCUBIERTO EL MAYOR NÚMERO PRIMO. La confusión a que induce el titular continúa a veces incluso en el texto. Nos enteramos, por ejemplo, de que un nuevo superordenador acaba de establecer que un número de 7067 dígitos, el $5 \times 2^{23.473} + 1$ es primo. Carece de divisores, exceptuados, claro está, el propio número y la unidad. La historia referida en el artículo pudiera muy bien obviar (o el lector, pasar por alto) que se trata simplemente del máximo de los primos conocidos; es muy posible que poco tiempo después se descubra otro primo mayor.

No sé si mencionar el máximo de los números primos descubiertos hasta el presente. Puede que ya no lo sea cuando aparezcan impresas estas palabras. Cuando redacto estas líneas, el máximo de los primos conocidos tiene 65.050 cifras; es el $2^{216.091} - 1$, descubierto en 1985 por David Slowinski, de Cray Research, Inc. Los números primos que son de la forma $2^m - 1$ se llaman "primos de Mersenne", en honor del religioso francés Marin Mersenne, eminente científico y filósofo y distinguido aficionado a la matemática. La colección de todos los primos mayores que 1000 ha sido recopilada por otro aficionado, Samuel D. Yates, de Delray Beach, Florida. Yates pone el conjunto generosamente a disposición de los lectores que envíen el costo de copiarlo y del franqueo (3 dólares US) a 157 Capri-D, Kings Point, Delray Beach, Florida 33445.

¿A qué velocidad se enrarecen los números primos a lo largo de los ribazos del continuo? Entre los diez primeros números naturales, cuatro, es decir, un 40 por ciento, son primos. Entre los 100 primeros, el porcentaje cae al 25 por ciento. La proporción sigue decreciendo más o menos progresivamente. En general, el número de primos menores o iguales que un número n es aproximadamente igual a $n/\log n$. (En este contexto, la aproximación es asintótica. Dicho de otro modo, si representamos por $p(n)$ el número de primos menores o iguales que n, la razón de $p(n)$ a $n/\log n$ se va aproximando a 1 conforme crece n. Citando del viejo minero: "Aguas abajo, los primos van enrareciéndose en un factor de logaritmo natural".)

Unos cuantos ensayos nos permitirán intuir el significado de la regla. ¿Cuántos primos hay, según la fórmula, entre 1 y 100? ¿Y entre 1 y 1000? En el primer caso, la fórmula nos da como valor aproximado 22. En el segundo, predice unos 145 primos.

Nadie se sorprenderá de que el fenómeno del enrarecimiento provoque la aparición de tramos cada vez más largos de números consecutivos que no contienen número primo alguno. Para hallar una tanda de un millón de números compuestos consecutivos sólo es necesario navegar aguas abajo (como en cierta ocasión hizo Martin Gardner) hasta el número 1.000.001!. El signo de admiración no significa aquí exclamación, sino elaboración: denota el factorial del número, esto es, $1 \times 2 \times 3 \times \ldots \times 1.000.001$. Podemos, no obstante, detectar fácilmente el tramo carente de primos. Cuando n recorre los valores de 2 a 1.000.001 en la sencilla



2. La espiral de Stanislaw Ulam revela vetas de primos

fórmula 1.000.001! + n, todos los números obtenidos son compuestos. Después de todo, en cada caso, n divide tanto a 1.000.001! como a sí mismo. Por consiguiente, divide a la suma.

Afirmé anteriormente que no existía una fórmula para obtener números primos, que ninguna combinación de operaciones algebraicas efectuadas sobre n producirá, en un número finito de vueltas de manivela, el n-ésimo número primo. Son muchas las personas que se han dejado seducir por vanas presunciones nacidas de un éxito inicial. Un chiste muy conocido entre estudiantes de matemáticas ilustra perfectamente el caso. El chiste cuenta tres formas de demostrar que todos los números impares son primos:

El matemático: "Tres es primo, 5 es primo, 7 es primo... El teorema se demuestra por inducción."

El físico: "Tres es primo, 5 es primo, 7 es primo, 9 (error experimental), 11 es primo..."

El ingeniero: "Tres es primo, 5 es primo, 7 es primo, 9 es primo..."

Quizá los últimos que rían sean los ingenieros, pues los matemáticos dependen cada vez más de los ordenadores en su búsqueda de primos grandes.

¿Bastaría con hallar la fórmula que produjera solamente números primos? El famoso matemático del siglo XVII Pierre de Fermat creyó haberla descubierto cuando escribió $2^{2^n} + 1$. Insertemos en ella un valor cualquiera de n, y saldrá a la luz un número primo. La preciosa fórmula de Fermat resultó ilusoria pompa de jabón, que reventó después de muerto Fermat, pues el matemático suizo Leonhard Euler descubrió que el quinto de los "primos" de Fermat tenía divisores: 4.294.967.297 = 641 × 6.700.417.

Pero, como afirmaría el viejo minero, "hay más de una forma de despellejar un gato". En ocasiones, una figura o pauta visual puede sugerir una fórmula. Un día, el matemático polaco-estadounidense Stanislaw Ulam garabateó una de esas pautas. Mientras asistía a una aburrida lección, comenzó distraídamente a cuadricular una hoja, trazando líneas horizontales y verticales. Escribió un 1 en una de las casillas, y procedió a numerar sucesivamente, en espiral, las cuadrículas situadas alrededor de la primera:

5	4	3
6	1	2
7		

67	1	43
13	37	61
31	73	7

3	61	19	37
43	31	5	41
7	11	73	29
67	17	23	13

*3. Matrices desintegradas de David H. Fax (*izquierda*) y Patrick E. Kane (*derecha*)*

3	1	3	9	9	1
9	8	3	9	2	9
1	6	4	3	1	2
5	1	7	4	7	1
7	1	5	9	7	1
9	3	7	3	3	9

4. Retícula de 6 por 6 de Gordon Lee

Cuando la espiral de números se había arrollado varias veces sobre sí misma, Ulam, sin ningún propósito en particular, comenzó a ovalar los primos. Pronto se enderezó en su asiento, advirtiendo la aparición de una curiosa pauta. ¡De la nada, habían surgido líneas rectas! Ulam se percató inmediatamente de que tales rectas sugerían fórmulas explícitas para los números primos. La figura 2 es una reproducción por ordenador del experimento que Ulam efectuó con lápiz y papel; en ella, los números compuestos se han sustituido por cuadraditos blancos y, los primos, por cuadraditos negros.

Las líneas oblicuas que tanto resaltan corresponden a vetas de números primos. ¿Cómo expresar simbólicamente este hallazgo geológico? En el centro del diagrama se reconoce uno de tales filones, que corre hacia abajo y hacia la izquierda. Está compuesto por la sucesión 7, 23, 47, 79,... La fórmula correspondiente a tal secuencia resulta ser de segundo grado: $4x^2 + 4x - 1$.

Quienes todavía recuerden un poco las matemáticas de su bachillerato podrán deducir la fórmula de prácticamente todas las rectas del diagrama. Puede muy bien suceder que la fórmula genere abundantes primos, que desborden holgadamente los límites de la gráfica. Euler ya había atinado con una fórmula similar a mediados del siglo XVIII: $x^2 + x + 41$. Para que esta fórmula figure en la espiral de Ulam es preciso que en la posición central figure un número diferente. ¡Una espiral que parta de 41 hará aflorar a la superficie un placer de 40 primos consecutivos antes de agotarse!

Tal vez sólo los señoritos de ciudad traten de hallar filones de primos mediante fórmulas explícitas. Quienes laborean las orillas del Río del Continuo prefieren areles, o mejor todavía, cajas de lavado. En dichos artilugios, también conocidos como cribas numéricas, se van echando paladas de números por un extremo; por el otro sólo emergen los primos. Unas costillas, o travesaños de madera, se encargan de atrapar mediante criterios de divisibilidad los números compuestos [*véase la figura 1*]. Por supuesto, las cajas de lavado funcionan perfectamente en el interior de los ordenadores.

La caja de lavado más simple procede a separar los primos mediante división por 2, 3, 4, etcétera. Se introduce por un extremo el número n y la caja de lavado comprueba si es divisible por 2, por 3, por 4,... y así continúa hasta que, o bien una de las pruebas tiene éxito, o bien el tanteo alcanza al número n. En el primer caso, el número no es primo, sino compuesto; en el segundo, sí es primo. El algoritmo para este modelo de lavadero nos facilitará un armazón de máxima simplicidad para crear programas en un ordenador doméstico. Lo llamamos CRIBA1:

```
entrar n
f ← 1
desde k ← 2 hasta n − 1
  prueba ← resto(n/k)
  si prueba = 0 entonces f ← 0
si f = 1 entonces imprimir "primo"
```

El programa acepta un número n, que el operador humano le proporciona a través del teclado. Seguidamente, el programa asigna a la variable f (que actúa como banderín indicador) el valor 1; si f conserva todavía el valor 1 cuando el programa alcanza la última línea, el número n será primo. Hay en el programa un bucle que se ejecuta reiteradamente, controlado por un enunciado de bifurcación condicional (si... entonces...); el bucle del índice va recorriendo los valores de 2 a $n - 1$. Para cada uno de esos valores, CRIBA1 efectúa la división n/k, toma el resto y almacena el resultado con el nombre *prueba*. En circunstancias normales, el valor de *prueba* tras cada pasada del bucle diferirá de 0, es decir, el número k no dividirá exactamente al n. Pero si

alguna vez la división da resto 0, CRIBA1 arriará inmediatamente el banderín f, dándole valor 0 y manteniéndolo en esa posición hasta terminar el bucle. En el caso de que el segundo enunciado condicional tenga resultado positivo, el programa imprimirá "primo". Mas si f se ha puesto a 0 en algún momento del proceso, sólo se producirá un tétrico silencio.

Aunque fácil de comprender, el programa resulta demasiado lento, especialmente si se tiene la intención de modificarlo para que genere una sucesión de números primos. La adaptación consistiría, sencillamente, en cambiar la primera línea, la de introducción del número a ensayar, por un bucle, como "desde $n \leftarrow 3$ hasta 1000". Se modificaría igualmente el enunciado final para que no sólo imprimiera "primo", sino el valor de n que ha conseguido atravesar de cabo a rabo el lavadero sin encontrar divisor exacto. Uno a uno, los primos de 3 a 997 irían cayendo a trompicones de la criba, ¡pero muy lentamente!

Las cosas avanzan mucho más deprisa después de hacerle algunos arreglos a CRIBA1. Ante todo, carece de sentido tantear si la división n/k es exacta en el caso de que k sea mayor que la raíz cuadrada de n, pues si n admite divisores, al menos uno de ellos habrá de ser menor o igual que su raíz cuadrada. El célebre "teorema fundamental de la aritmética" dice, asimismo, que todo número entero es producto de un conjunto unívocamente determinado de números primos. El número no es compuesto a menos que resulte divisible por un número primo menor que él mismo. Al combinar ambos hechos se obtiene un bucle mucho menor, en el que sólo se utilizan valores primos para el índice k que sean, además, menores que la raíz cuadrada de n.

El nuevo algoritmo, llamado CRIBA2, se diferencia lo suficiente de su ingenuo predecesor para merecer un nuevo listado:

```
r ← 1
p(1) ← 2
desde n ← 3 hasta 1000
  k ← 1
  f ← 1
mientras f = 1 y p(k) ≤ rzcdr(n)
  prueba ← resto(n/p(k))
  si prueba = 0 entonces f ← 0
  k ← k + 1
si f = 1 entonces r ← r + 1
  p(r) ← n
```

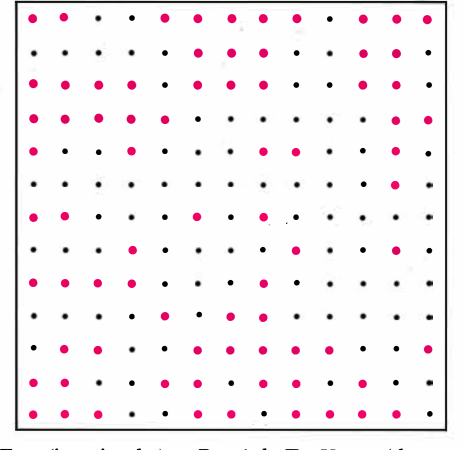
Dado que, para funcionar correctamente, CRIBA2 necesita disponer de una lista de números primos, conforme los va generando los almacena en la tabla p. La variable r lleva control de la última entrada asentada en la tabla p. De ese modo, CRIBA2 sabe siempre dónde colocar el siguiente primo que genere. La primera línea del algoritmo coloca el índice a 1. La línea siguiente especifica que el primer miembro de la tabla de primos sea 2. A continuación viene la orden de bucle antes comentada. El bucle tiene a su cargo la revisión de todos los números comprendidos entre 3 y 1000. La variable k lleva control de cuál es el elemento de la tabla con el que se está comparando n en ese momento. El bucle principal alberga un tipo corriente de bucle en el que se utiliza la palabra "mientras"; en tanto el banderín señalizador se encuentre en 1 y el número primo a ensayar en ese momento no supere la raíz cuadrada de n, el bucle interior seguirá traqueteando por los sucesivos valores de k. En el exterior de ese bucle, f será igual a 0 o a 1. En el primer caso habremos encontrado un número primo y CRIBA2 lo añade a su lista. En el segundo, el bucle principal procederá sin más a tomar el siguiente valor de n.

Para que imprima todos los primos hallados, los lectores que vayan a programar ese tipo de mesa de lavado disponen de dos opciones a la hora de estructurar el programa. Una, que CRIBA2 imprima la tabla p entera inmediatamente después de completarse el algoritmo principal. Se trata de una experiencia próxima a la de abrir un placer lleno de pepitas. Otra, situar una orden de impresión inmediatamente después de la línea $p(r) \leftarrow n$, que a algunos les parecerá más emocionante. En tal caso, el usuario del programa va viendo aparecer las pepitas en cuanto se descubren.

No me he arriesgado mucho al sugerir un límite de iteración de sólo 1000 números. Nada impide elevar el límite a 100.000 o incluso un millón. ¿O tal vez sí? Todo depende de la medida máxima que nuestro equipo pueda darle a la tabla. El tamaño de la tabla es función directa del número de primos que queramos generar. En este punto nos viene al pelo la fórmula sobre la proporción de números primos respecto del total de números; sugiere que, entre los números menores que 1.000.000, alrededor de 72.382 son primos. Un ordenador que sólo disponga de 64K no cubrirá las necesidades.

Un sinfín de recreaciones matemáticas hacen uso de los números primos. Se me vienen a las mientes dos diversiones que insisten en el tema de los números primos dispuestos en formaciones cuadradas. La primera es idea del británico Henry Ernest Dudeney, distinguido creador de problemas y rompecabezas. A muchos lectores les resultarán familiares los cuadrados mágicos; se trata de tablas cuadradas de números que suman lo mismo a lo largo de filas, columnas y diagonales. ¿Existirán cuadrados mágicos integrados exclusivamente por números primos? La respuesta es que sí. El cuadrado mágico de 3 por 3 de la figura 3 suma 111 (que no es primo) a lo largo de filas, columnas y diagonales. Al cuadrado de 3 por 3 le acompaña un camarada de 4 por 4. Se han descubierto cuadrados mágicos de órdenes mayores que 4. Se invita a enviárnoslos a los lectores que los descubran por ellos mismos; el mejor de los ejemplos se publicará en un artículo futuro. Los cuadrados grandes se valoran más que los pequeños; a igualdad de tamaño, se prefieren los de menor suma.

Otro británico, también creador de rompecabezas, ha lanzado un reto a los



5. Matrices desintegradas de David H. Fax (izquierda) *y Patrick E. Kane* (derecha)

lectores. Gordon Lee, que escribe la sección fija "Winners and Losers" en la revista de informática *Dragon User*, ha construido un cuadrado de 6 por 6 compuesto por dígitos, en el que se ocultan gran cantidad de números primos, 170, para ser exactos [*véase la figura 4*]. Para hallar un número primo en el casillero de Lee, inspecciónese cualquier fila, columna o diagonal, en cualquier dirección. Puede que la sucesión de dígitos considerada forme un número primo, uno de los 170 descubiertos por Lee. No caben más de 616 números (primos o no) en un casillero de 6 por 6 de dígitos. Los números primos que se repitan se contarán una sola vez. Lee incluye el 1 entre los primos.

¿Lograrán los lectores dar con un cuadrado de tamaño 6 por 6 compuesto por números de una sola cifra y que contenga más de 170 primos? Quienes hayan preparado los programas CRIBA1 y CRIBA2 gozarán de cierta ventaja para realizar la tarea. Lee sugiere la estrategia de sembrar el cuadrado con los dígitos 1, 3, 7 y 9, pues todo número primo habrá de terminar en uno de ellos. Por el contrario, en un cuadrado que sólo contuviera esas cifras habría relativamente pocos primos. Un juicioso rociado de números pares, el 0 entre ellos, aumentaría las probabilidades de afrontar el reto de Lee. Publicaré la mejor de las soluciones que se me envíen (siempre y cuando contenga más de 170 números primos.)

Esta sección se ocupó en el pasado mes de mayo de un laboratorio doméstico-informático en el que, para simular los efectos de la presión, las moléculas de un hipotético gas rebotaban contra las paredes de un recipiente cerrado. En otra vasija, las moléculas se difundían digitalmente de uno a otro lado. En un postrer ejemplo, los ficticios átomos de la sustancia peligrosamente inestable que llamé redio se reunían hasta alcanzar la masa crítica. Unos cuantos lectores han preparado sus propios recipientes a presión y cámaras de difusión, pero la mayoría no ha podido resistirse al redio. Procedentes de todo el mundo, han surcado la mesa de mi despacho los informes de "explosiones computarizadas".

Al especificar la trayectoria de escape de un neutrón por medio de una ecuación lineal, inadvertidamente di por hecho que dos neutrones viajan en direcciones opuestas al escapar del átomo escindido. Casi todos los lectores optaron por elegir una de las dos direcciones. En ninguno de ambos casos constituía tarea fácil lograr fisionar todos los átomos de una retícula plana de n por n.

Efectuando una representación gráfica de los resultados de numerosos experimentos, Robert Castle, de Webster, Texas, halló que en las retículas de 16 por 16 solía fisionarse el 90 por ciento de los átomos. Cuando n alcanzaba el valor 32, se desintegraba el 99 por ciento de los átomos. Robert M. Martin, profesor de filosofía de la Universidad canadiense Dalhousie, de Nova Scotia, obtuvo un valor crítico del 90 por ciento cuando n era igual a 19; encontró también que desaparecía el 99 por ciento del redio cuando n era igual a 39. Casi todos los demás experimentadores dieron con valores intermedios. Resulta arquetípico el caso de Richard W. Smith, de Ann Arbor, Michigan, entre quienes se atuvieron a la desintegración con emisión de dos neutrones propuesta en la receta original. Smith informa de una desintegración del 98 por ciento cuando la retícula medía 15 por 15.

Pocos lectores han desarrollado sistemas tan refinados como el programa SHAKEY. Desarrollado por Robert M. Merkin, de Northampton, Massachusetts, además de manejar retículas muy grandes, incluye multitud de técnicas para acelerar la decisiva explosión. El reactor nuclear doméstico SHAKEY permite ensayar espaciados de la cuadrícula y emite un *clic* cada vez que se produce una desintegración, como los contadores Geiger. Merkin me dice que le encantará compartir SHAKEY con los lectores que le escriban a 55 Milton Street, Northampton, Massachusetts. 01060, Estados Unidos.

David H. Fax, de Pittsburg, Pennsylvania, y Patrick E. Kane, de Champaign, Illinois, me han hecho llegar espectaculares ejemplos de matrices desintegradas. La figura 5 muestra sus logros.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE QUEEN OF MATHEMATICS. Eric Temple en *The World of Mathematics*, dirigido por James R. Newman. Simon and Schuster, Inc., 1956.

AMUSEMENTS IN MATHEMATICS. Henry Ernest Dudeney. Dover Publications, Inc., 1970.

A LA BÚSQUEDA DE NÚMEROS PRIMOS. Carl Pomerance en *Investigación y Ciencia*, n.° 77, págs. 80-89; febrero de 1983.

ONE MILLION PRIMES THROUGH THE SIEVE. T. A. Peng en *Byte*, vol. 10, n.° 11, págs. 243-2344; otoño de 1985.

Libros

Flora mexicana, atlas epidemiológico y ayer de las fábricas hidráulicas españolas

Luis Alonso, María José Báguena y Pere Molera

FLORA NOVO-GALICIANA. A DESCRIPTIVE ACCOUNT OF THE VASCULAR PLANTS OF WESTERN MEXICO. Volume V. Leguminosae, por Rogers McVaugh. The University of Michigan Press, 1987.

Catalogar la flora de un país constituye una tarea primordial del quehacer botánico de todos los tiempos. Se trató primero de recoger las especies que tenían un interés médico, veterinario y cosmético. Tal fue el caso de los rizótomos griegos, por ejemplo, o los libros sobre los simples, desde Dioscórides en adelante, sólido reducto de la botánica durante siglos. Con el renacimiento medieval comienza a estudiarse la planta por sí misma y a entronizarse ciertos grupos "naturales". Las floras propiamente dichas pertenecen ya al siglo XVI con los Brunfels, Fuchs, Tragus y, sobre todo, Cesalpino, figura máxima de la historia natural. En 1576 publicó Clusius su famosa *Rariorum aliquot stirpium per Hispanias observatarum Historia*, lo que podríamos considerar el primer inventario de nuestro país. Pero la inmensa mayoría de las naciones no han acabado el archivo de su patrimonio florístico. Por no asomarnos fuera, la publicación de la Flora Ibérica avanza con lentitud exasperante, a pesar de contar la península con un grupo de botánicos de primera fila.

El sistemático ha de enfrentarse, en primer lugar, con el problema de la identificación del ejemplar, es decir, de la adscripción del mismo a determinada especie. En un segundo momento se preocupará de acotar los límites taxonómicos exactos que deben definir la especie, el género y las categorías superiores (familias, órdenes, etcétera). Aunque sean dos funciones complementarias, la identificación o catalogación puede realizarse con independencia de la segunda, es decir, sin poner en cuestión el criterio admitido para incluir determinado ejemplar en determinado taxón.

Desde siempre, desde el neolítico o los tiempos de la domesticación de los vegetales por la agricultura, algunas clasificaciones fueron obvias: se acomodaron a la manifestación palmaria de ciertos caracteres discriminantes. Tal es el caso de las leguminosas, o el de las gramíneas. Por supuesto, no en el estado de perfección con que hoy las conocemos. La familia de las leguminosas se subdivide en tres subfamilias: Caesalpinioideae, Mimosoideae y Papilionoideae. Las primeras poseen las hojas pinnadas y sin estípulas; flores formando panícula o racimo; anteras longitudinalmente dehiscentes y semillas con una radícula recta. Las Mimosoideae se caracterizan por sus hojas bipinnadas, flores en espiga o cabezas globosas; anteras más o menos iguales y semillas con pleurograma. Los rasgos distintivos de la subfamilia de las Papilionoideae son sus hojas sencillas, flores zigomórficas en forma característica de velero y semillas sin pleurograma. Conviene recordar que en botánica no hay nada absoluto y que esos rasgos son persistentes en la mayoría de los casos, pero no siempre.

La fama de las leguminosas ha ido de la mano de su interés económico (los fríjoles constituyen un alimento de suma importancia en México), médico (principios activos) e industrial (materia prima). Este prestigio se ha visto favorecido, en muchísimos hábitats, por el número ingente de especies que cobijan. Las mimosáceas, por ejemplo, abarcan unas 3000 especies, sobre todo en formas arbustivas y arbóreas; hay unas 2200 cesalpináceas, que predominan en zonas tropicales y subtropicales, y sobrepasan la cifra de 12.000, repartidas en unos 450 géneros, las especies de fabáceas o papilionáceas. De cada especie que prospera en Nueva Galicia, en el oeste mexicano, nos da McVaugh la bibliografía pertinente, la ubicación geográfica y la descripción morfológica.

El texto tiene, además, un contexto que refuerza la oportunidad de su reseña en las páginas de la revista. Rogers McVaugh es un eminente americanista escasamente apreciado entre nosotros más allá de las fronteras de la botánica y su historia. Como especialista en ambas, conocía mejor que nadie la importancia y los avatares de la *Flora Mexicana* y de la *Plantae Novae Hispaniae*, manuscritos de Martín de Sessé y José Mariano Mociño, los autores que el lector verá constantemente citados en la obra. Según es sabido Sessé y Mociño protagonizaron la expedición naturalista de 1787-1803, enviada para explorar la fauna y la flora de Nueva España. Y en efecto, recorrieron el Caribe, México, Guatemala, Baja y Alta California e hicieron alguna incursión hasta Alaska. Acompañaban a los manuscritos en cuestión los correspondientes dibujos polícromos (*Icones*) realizados en su mayoría por Atanasio Echevarría y Juan Vicente de la Cerda. "In technical and artistic quality, Echevarría's work compares favorably with any other in the history of biological illustration. Norwithstanding this artistic excellence, the chief value of the collection lies in its scientific and historical significance." (*Bulletin of the Hunt Institute for Botanical Documentation*, vol. 3; n.º 1; 1981).

Esos dibujos de tan excelso valor recalaron por fin en España tras una singular aventura, que no viene al caso. McVaugh, que llevaba 30 años buscándolos, los encontró en Barcelona. Los compró y se los llevó a Estados Unidos. Nuestro país vio así mermado un capítulo valioso de la historia de su ciencia. Para hacerse una idea mejor de ello basta leer en este contexto la *Flora Novo-Galiciana*. (L.A.)

ATLAS EPIDEMIOGRÁFICO DEL COLERA DE 1885 EN ESPAÑA (1887), por Philippe Hauseer. Valencia; Conselleria de Sanitat i Consum, 1987.

La obra que nos ocupa supone una de las máximas aportaciones a la cartografía epidemiológica del siglo XIX. Representa gráficamente la evolución de la epidemia colérica que azotó España durante 1884 y 1885. La enfermedad comenzó en el otoño de 1884 y, tras una pausa en invierno, rebrotó en primavera en la provincia de Valencia, desde donde se extendió al resto de la península.

Esta epidemia originó un gran número de estudios, debido en buena parte a su coincidencia en el tiempo con el descubrimiento del vibrión colérico por Robert Koch en 1883 y la aplicación en Valencia de la vacunación anticolérica por vez primera en el mundo, hecho llevado a cabo por Jaime Ferrán. Ambos acontecimientos provocaron una gran polémica entre los partidarios del origen microbiano del cólera y los anticontagionistas. Los primeros tuvieron que enfrentarse asimismo a los defensores de la llamada "teoría telúrica",

que afirmaba que "para la génesis de una epidemia... no basta la presencia de un germen específico de la enfermedad, sino que necesita también ciertas causas auxiliares: primero, *una disposición individual de los hombres*, y segundo, *una disposición temporal de las localidades*". Esta cita pertenece a Max von Pettenkoffer, cuyas ideas encontraron en Hauser a uno de sus máximos defensores en España.

Philippe Hauser (1832-1925), médico de origen húngaro y nacionalizado español, residió desde 1872 hasta su muerte en España, concretamente en Sevilla y Madrid, ciudades en las que compaginó con éxito el ejercicio profesional y una intensa actividad científica, relacionándose con los integrantes de la vanguardia científica española.

La salud pública fue el tema principal en la obra de Hauser. Durante su estancia en Sevilla escribió *Estudios médico-topográficos y médico-sociales en Sevilla (1882-1884)* y en su etapa madrileña se ocupó fundamentalmente del cólera, en el que defendió la ya mencionada teoría "telúrica" o "localista" de Pettenkoffer, y de la geografía médica, estudios que dieron origen a su tratado *La geografía médica de la Península Ibérica*, en el que asoció la investigación epidemiológica y demográfica con la geográfica, geológica y meteorológica.

El *Atlas epidemiográfico del cólera de 1885 en España*, que ahora se reedita en facsímil, apareció como suplemento de los *Estudios epidemiológicos relativos a la etiología y profilaxis del cólera* (1887), obra en tres volúmenes en la que contó con la colaboración de los alcaldes y médicos titulares, quienes le enviaron información sobre la marcha de la epidemia colérica en sus respectivas localidades a través de un cuestionario remitido por Arcadio Roda, director general de beneficencia y sanidad y amigo personal del autor.

En el primer volumen, Hauser describió la evolución de la epidemia colérica en España durante 1884 y 1885, interpretada desde la teoría "telúrica". El segundo volumen, prologado por Pettenkoffer, analiza estadísticamente la mortalidad producida por el cólera y compara las doctrinas vigentes sobre el origen y profilaxis de la enfermedad, con las observaciones hechas durante la epidemia estudiada. El tercer volumen contiene las respuestas enviadas por los alcaldes y médicos titulares al cuestionario de Roda.

La obra se completa con veintinueve láminas que incluyen gráficas epidemiológicas y con un "atlas epidemiográfico" de indudable valor. Este último consta de dieciocho mapas. El primero refleja "la intensidad gradual de la epidemia en las distintas provincias"; los cinco siguientes, "la invasión progresiva del cólera" desde junio a septiembre; cuatro más están dedicados al avance de la enfermedad en la provincia de Valencia y se siguen de otros cuatro mapas sobre varias provincias afectadas. El atlas concluye con "la marcha del cólera" en las cuencas fluviales españolas, como muestra de la teoría "telúrica" defendida por Hauser.

En la elaboración de la mayor parte de los mapas colaboró el geógrafo Francisco Coello de Portugal y Quesada, quien disponía de una notable información cartográfica.

Esta obra recibió en 1888 el Premio Bréant otorgado por la Academia de Ciencias, de París, que cada año lo destinaba a la investigación más destacada sobre el cólera. En 1907, fue concedido a Jaime Ferrán, por la preparación de la vacuna anticolérica que Hauser, fiel a su concepción del origen del cólera, criticó duramente.

La presente edición se acompaña de

un estudio introductorio muy preciso realizado por José María López Piñero, quien ha llevado a cabo una excelente reconstrucción biográfica del autor de la obra. En las notas de esta introducción puede encontrarse una bibliografía completamente actualizada en torno al tema de la epidemia colérica de 1885 en España.

Este atlas, editado con gran esmero, ha sido publicado por la Conselleria de Sanitat i Consum de la Generalitat Valenciana, dentro de la serie Monografías Sanitarias, creada con el objetivo de difundir la producción científica valenciana relacionada con la Salud Pública. Esta serie se inició en 1985 con la publicación de la edición facsímil de la obra de Jaime Ferrán, Amalio Gimeno e Inocente Pauli, *La inoculación preventiva contra el cólera morbo asiático* (1886). En la misma línea de reedición de textos clásicos figura el Atlas de Hauser, lo que permite disfrutar de una obra equiparable en su género a las mejores publicadas en Europa durante el último cuarto del siglo XIX. (M.J.B.)

FÁBRICAS HIDRÁULICAS ESPAÑOLAS, por Ignacio González Tascón. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Biblioteca CEHOPU; Madrid, 1988.

En este libro se expone sistemáticamente el desarrollo a través de los siglos de la evolución de las principales artes hidráulicas. Se describen la mecánica, tipología y funcionamiento de molinos, batanes, trapiches, almazaras y otros diversos ingenios, que el hombre ha utilizado para aprovechar la energía de las corrientes de agua, arroyos, ríos y mareas. La perspectiva de este tratado es fundamentalmente hidráulica, pero también encontrará el lector el estudio del entorno histórico, jurídico y técnico de estas fábricas, que han conocido una rica tradición en España.

Al inicio del libro se pone al alcance del lector el agua en el mundo antiguo: "La construcción de canales –dice el autor– alcanzó ya en el siglo VI a. de C. una perfección notable, siendo Eupalinos, hijo de Náustrofo de Megara, el primer gran ingeniero hidráulico conocido en el mundo griego. Para abastecer de agua a Samos, Eupalinos construyó un canal cuya mayor dificultad radicaba en la perforación de un túnel en roca de aproximadamente un kilómetro de longitud que exigió el empleo de una técnica muy avanzada, ya que se efectuó perforando simultáneamente desde ambas bocas, lo que exigía profundos conocimientos de topografía y geometría, así como el empleo de instrumentos de nivelación bastante perfectos. El éxito de Eupalinos, al lograr con un error muy pequeño que ambas perforaciones se encontrasen, da una idea no sólo del alto nivel científico, sino también de una sociedad a la que con demasiada frecuencia se ha atribuido un desdén por los oficios mecánicos".

En España sobresalen las construcciones romanas de Preserpina y Alcantarilla, consistentes en oponer al empuje del agua un muro vertical de poco espesor, insuficiente para resistir por sí mismo la presión hidrostática. Este muro se refuerza con un terraplén adosado aguas abajo que ayuda a resistir, cuando el embalse está lleno, encargándose al muro la función de actuar como pantalla impermeable.

Es sabido que, en las minas de Riotinto (Huelva), los romanos beneficiaban el oro y la plata, construyendo pozos y galerías que alcanzaban grandes profundidades, del orden del centenar de metros. El desagüe de los pozos y galerías no era posible hacerlo por medio de un canal de evacuación, al no tener una cota más baja en el exterior de la explotación. En estos casos, los mineros recurrían a máquinas de desagüe accionadas con las manos o los pies del hombre: los tornillos, las bombas y las ruedas. Además de los tornillos egipcios, conocían los romanos otra máquina que permitía elevar el agua sin el empleo de ruedas. Se trata de las bombas de pistones, en las que el agua sometida a presión es obligada a ascender por una tubería. Tal vez el mejor ejemplar de los que se conservan hoy sea el que se ha hallado en la mina romana Sotiel Coronada (Huelva), custodiado en el Museo Arqueológico de Madrid. Esta bomba aspirante-impelente está formada por dos cilindros huecos en cuyo interior se mueven sendos pistones. El material de la bomba es bronce recubierto de calamina (carbonato de zinc), para evitar la agresión de los ácidos formados a partir de las disoluciones de las piritas de la mina Sotiel Coronada. La bomba se accionaba a mano con una sencilla palanca, que es posible que fuera de madera.

En la España musulmana (Al-Andalus), que era la región más adelantada de Europa, sobresalían los molinos. Había gran cantidad de ellos para fabricar papel a partir de trapos y, sobre todo, molinos de viento para el regadío. Las ciudades se abastecían del agua de los ríos a través de ingeniosas ruedas llamadas azudas. Ruedas que en la región murciana eran conocidas como ñoras.

Mucha importancia tuvo el agua en la fabricación del hierro y del acero (aleación de hierro con carbono). El autor describe la industria del hierro (siderurgia) así: "Para lograr objetos de hierro sin llegar a fundirlo, dos procesos son necesarios: el cinglado y la forja.

En la operación, el mineral (óxidos generalmente) molido y el combustible (madera) se introducían en un tronco de árbol hueco recubierto interiormente de arcilla, o en un tosco horno de materiales refractarios (areniscas, cuarcitas, arcillas). Allí iniciaban la combustión avivándola con fuelles de piel movidos con las manos o los pies. Esta tarea agotadora limitaba la cantidad de mineral que era posible tratar en una hornada. El oxígeno del óxido se combinaba con el carbón de la madera, y el hierro quedaba libre, en estado pastoso entre las escorias fundidas. Para aglutinar estas partículas de hierro reblandecido en una esponja o zamarra, se cinglaba, golpeando a mano la masa con un martillo; de este modo se expulsaban las escorias, soldándose las partículas de hierro aisladas.

"Un avance importante en este procedimiento fue la sustitución de la madera como combustible por carbón vegetal, obtenido al quemar parcialmente la leña, consiguiéndose así un producto de mayor poder calorífico que la madera...

"Prácticamente hasta el siglo XVIII, el carbón vegetal permanece como único combustible en la fragua, ya que el carbón de piedra confería al hierro una fragilidad que entonces resultaba inexplicable. Una vez obtenida la zamarra, era preciso efectuar las operaciones para dar al hierro la forma adecuada según los usos a los que se destinaba.

"Este hierro, que se obtiene sin fusión, es muy puro, ya que no tiene disueltos elementos extraños y se puede conformar calentándolo de nuevo, y batiéndolo a mano con un martillo; de este modo se le da la forma fácilmente, en la operación de forja. Pero el hierro así obtenido es bastante blando. Para endurecerlo es necesario añadir al hierro puro pequeñas cantidades de carbono, operación que llamaremos de cementación, y que ya conocían los cálibes de Asia Menor, unos 1500 años a. de C. El modo de transmitir carbono del carbón de leña al hierro forjado para convertirlo en acero, es decir, de cementarlo, es manteniendo en contacto directo el hierro y el carbono, en caliente, entre cinco y siete días, martilleando la pieza para contribuir a acelerar el proceso. Así se conseguía acero de un modo directo, el único modo posible durante siglos. Este acero de cementación (que contiene entre 0,15 y

1,5 por ciento de carbono), es ya muy duro, aunque frágil, rompiéndose con facilidad cuando es golpeado y, por tanto, inservible para fabricar armas. Dos siglos después de la aparición de la cementación, los ferrones descubren el temple del acero. Si se enfría el acero caliente en agua (temple) éste cobra tenacidad, perdiendo la fragilidad y conviténdose en un producto de gran valor, que se emplea en la fabricación de armas blancas y aperos de labranza. Pero todos estos procesos manuales tropiezan con la gran limitación de tener que producir hierro y acero en pequeña escala, pues es muy difícil manejar manualmente martillos de forja de grandes dimensiones y, además, para mantener calientes las piezas de gran tamaño se requiere una alimentación de viento en la fragua que los fuelles manuales no son capaces de suministrar.

Por eso, la aparición en la Edad Media de potentes martillos de agua, y de máquinas soplantes accionados hidráulicamente, significa una doble transformación. Por una parte, permite la obtención de hierro de forja y de acero de cementación a mayor escala, y de una forma mucho menos penosa; por otra, abre el camino a la fusión del hierro y a la aparición de nuevos problemas derivados de la naturaleza del hierro colado, y sobre todo de las impurezas que éste disuelve y que alteran sus propiedades haciéndolo a veces inservible''.

Así se explica que en el País Vasco aparecieran las ferrerías, que insuflaban aire al horno mediante fuelles accionados por la rueda hidráulica, mientras que en Cataluña sobresalía la farga catalana. En este último procedimiento siderúrgico el aire se introducía en el horno mediante el efecto Venturi producido por el agua al caer a lo largo de un tubo estrangulado.

Molinos harineros, almazaras (molinos de aceite), trapiches (molinos azucareros), molinos trituradores de menas, molinos de cerámica, vidrio, cereales, tabaco, cortezas (tenerías) y todo tipo de ingenios hidráulicos utilizados en las obras públicas, son tratados con rigor y erudición a lo largo de la historia hasta nuestros días.

El libro termina con una serie de apéndices dedicados a la evolución tipológica de las ruedas, a las turbinas hidráulicas, a las artes mecánicas y a la terminología. El autor, Ignacio González Tascón, es ingeniero de caminos y compagina su profesión con la docencia universitaria y con la investigación sobre historia de las obras públicas e historia de la tecnología. (P.M.)

Apuntes

La distrofia muscular de Duchenne constituye la forma más grave y frecuente de las miopatías humanas. Se transmite por herencia a través de un gen recesivo ligado al sexo y se caracteriza por la necrosis de las fibras musculares. Se conocía ya el gen y el producto que determina. Pero ahora se ha avanzado un paso más al descubrirse la patogénesis de dicho mal en una miopatía afín: la distrofia muscular canina ligada al sexo.

Pensaba Darwin que la profundidad de la corola había sido la respuesta que ciertas plantas dieran a la evolución de los insectos polinizadores, cuya lengua habría crecido por aumento general de proporciones o por mor de un mayor rendimiento en la libación. Ante el desarrollo de ese órgano, las plantas de flor somera se hallarían en desventaja en lo concerniente a la transferencia de polen, que requiere amplio contacto físico del animal con las anteras y los estigmas. Las orquídeas acaban de corroborar las hipótesis de Darwin: los insectos introducen su probóscide sólo lo necesario para extraer el néctar, la reducción artificial de la flor limita la adaptación de las plantas y existe correlación entre profundidad de la corola y supervivencia de la planta.

La Tierra no gira de manera uniforme, sino que sufre leves variaciones en su velocidad de rotación y en la dirección del eje. De acuerdo con análisis recientes, muy refinados, las breves oscilaciones del eje de rotación habría que atribuirlas a los cambios experimentados en la componente ecuatorial del momento cinético de la atmósfera.

El radón es un gas incoloro, inodoro e insípido. Pero letal, sobre todo si se le asocia con el humo del tabaco. Aunque su origen se remonta a las explosiones estelares que denominamos supernovas, su fuente inmediata yace en el suelo rocoso. En algunos estados, la legislación está urgiendo a los arquitectos a tomarlo en consideración a la hora de diseñar nuevos edificios.

Ain Ghazal es un famoso yacimiento arqueológico de las inmediaciones de Amman. Los habitantes del asentamiento neolítico, que gozó de días de esplendor entre el 7200 y el 5500 a.C., se transformaron en pastores nómadas ante el empobrecimiento, por sobreexplotación, del lugar. Esa degradación del medio pudo extenderse a otras zonas inmediatas.

Se denominan anádromas las especies de peces que viajan de aguas dulces al océano y catádromas las que siguen el curso inverso. Se ha comprobado que ese comportamiento varía con la latitud y con la productividad alimentaria del medio.

El modelo estándar que la física de partículas tiene admitido para explicar las interacciones débiles ha recibido un nuevo espaldarazo experimental al observarse la violación de la simetría en la desintegración del kaón. En concreto se ha medido la razón de las tasas relativas de las desintegraciones de kaones neutros, de vida larga y vida corta, en dos piones neutros y en otros dos cargados positivamente. Por ser esa doble razón menor que 1, queda excluida la teoría superdébil introducida *ad hoc* para explicar este tipo de desintegraciones.

Los grandes cambios que sufrieron la flora y la fauna de la Tierra durante la transición del Cretácico al Terciario, y que suele representarse en la extinción de los dinosaurios, se entienden mejor con el avance de la vulcanología. Hace unos 67 millones de años se produjeron aluviones de lava, con formación de islas en la convergencia de la placa india con la africana.

No siempre los términos jurídicos tienen equivalentes científicos. Ese es el caso de ''preembrión'', expresión de moda en medios políticos que carece de correlato biológico. La individuación génica ocurre en la fusión de ambas células germinales, que, en epigenética, señala el comienzo de las fases embrionarias.